

Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

***DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA  
CARACTERIZAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS  
EM CHAPAS FINAS***

Dissertação submetida à Universidade Federal de  
Santa Catarina para obtenção do grau de mestre em  
engenharia mecânica

**Cesar Kanda**

Florianópolis, Março de 1999

# **DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS FINAS**

**CESAR KANDA**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE

**“MESTRE EM ENGENHARIA”**

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA - Área de Concentração METROLOGIA E  
INSTRUMENTAÇÃO, e aprovada em sua forma final pelo CURSO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

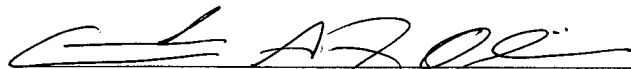


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
ORIENTADOR



Prof. Júlio César Passos, Dr.  
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

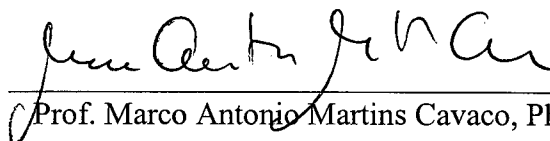
## **BANCA EXAMINADORA**



Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, D. Sc.



Prof. Frank Hrebabetzky, Dr. Rer. Nat.



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.

Aos meus pais

Aos meus familiares

## AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., pelo empenho em viabilizar este trabalho e pela orientação ao longo de toda sua realização;
- Aos meus pais, pelo apoio e pela educação que me possibilitaram ter;
- À todos os professores, colegas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho;
- Aos colaboradores da Fundação CERTI, pela amizade e apoio no trabalho;
- À Embraco – Empresa Brasileira de Compressores, pelo apoio técnico e financeiro e pela confiança depositada;
- Ao Estagiário Ledo Giuliano Vendruscolo, pelo auxílio, dedicação e competência;
- Ao Engenheiro Eráclito Meireles da Silva Jr., pelo apoio técnico;
- À Rosana Magali Vieira, pelo apoio e eficiência;
- À UFSC e à Fundação CERTI, pela disposição de sua infra-estrutura;



# SUMÁRIO

<b>Relação dos principais símbolos e variáveis utilizados .....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - Tensões Residuais.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Definições dos tipos de tensões residuais .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Origem das tensões residuais: .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Tensões residuais em chapas .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Efeitos das tensões residuais em peças estampadas a partir de chapas finas .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 3 - Caracterização de tensões residuais de membrana.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Modelamento matemático .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Software para a caracterização das tensões residuais de membrana .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Medição das distâncias entre centros .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.1 Teste de repetitividade na máquina de medir por coordenadas .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 Estimativa do valor da repetitividade na medição dos parâmetros da ovalização .....</b>	<b>26</b>
<b>3.5 Ensaios Realizados.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.1 Gráficos dos resultados.....</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 4 - Caracterização de tensões residuais de flexão .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Modelo matemático .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 5 - Medição do empenamento do disco por moiré de projeção .....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 6 - Sistema computadorizado para caracterização de tensões residuais de flexão.....</b>	<b>46</b>
<b>6.1 Requisitos de projeto.....</b>	<b>46</b>
<b>6.2 Implementação .....</b>	<b>46</b>
<b>6.3 Cálculo do empenamento máximo e mínimo.....</b>	<b>50</b>
<b>6.4 Compensação dos erros sistemáticos do sistema .....</b>	<b>54</b>
<b>6.5 Teste de repetitividade do sistema .....</b>	<b>55</b>

6.6 Estimativa do valor da repetitividade na medição dos parâmetros de empenamento.....	56
6.7 Ensaios realizados para determinação de tensão residual de flexão .....	58
6.6.1 Gráficos dos resultados.....	60
CAPÍTULO 7 - Conclusões .....	64
CAPÍTULO 8 - Referências Bibliográficas.....	68
ANEXO A - Requisitos do projeto do sistema de medição para caracterização de tensões residuais de flexão.....	72
A.1 Objetivos do produto.....	72
A.2 Cenário.....	72
A.3 Funções.....	72
ANEXO B - Lista dos principais componentes sistema computadorizado para medição de tensões residuais de flexão .....	74
ANEXO C - Mapas de fase obtidos nos ensaios para caracterização de tensões residuais de flexão .....	77

### Relação dos principais símbolos e variáveis utilizados

Símbolo	Significado	Unidade
$\sigma_R$	Tensões residuais	[MPa]
$\sigma_{RF}$	Tensões residuais de flexão	[MPa]
$\sigma_{RM}$	Tensões residuais de membrana	[MPa]
$dx^\circ$	Distância medida em um ângulo de $x^\circ$ em relação a um eixo horizontal imaginário do corpo de prova, antes da retirada do disco central	[°]
$dx^{\circ'}$	Distância medida em um ângulo de $x^\circ$ em relação a um eixo horizontal imaginário do corpo de prova, após da retirada do disco central	[°]
$\Delta d_x$	Variação do diâmetro medido antes e depois da retirada do disco, em um ângulo de $x^\circ$ em relação a um eixo horizontal imaginário do corpo de prova	[°]
$\Delta r(\theta)$	Variação do raio em função do ângulo polar	[mm]
$\Delta R_{med}$	Variação média do raio	[mm]
$\Theta$	Ovalização máxima	[ $\mu m$ ]
$\gamma$	Direção de máxima ovalização	[°]
$U_r(r, \theta)$	Deslocamento radial	[ $\mu m$ ]
$r$	Coordenada polar (raio)	[mm]
$\theta$	Coordenada polar (ângulo)	[°]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	-
$E$	Módulo de elasticidade do material	[MPa]

Símbolo	Significado	Unidade
$R_0$	Raio do furo	[mm]
$\sigma_1$	Tensão principal máxima	[MPa]
$\sigma_2$	Tensão principal mínima	[MPa]
$\beta$	Direção das tensões principais	[°]
$Re_d$	Repetitividade da medição do diâmetro	[mm]
$t$	Coefficiente t-student	-
$DP_{\Delta d}$	Desvio padrão das diferenças dos valores das distâncias em relação às respectivas médias	[mm]
$Re_{\Delta d}$	Repetitividade da medição da variação do diâmetro	[mm]
$\rho_1$	Maior raio de curvatura encontrado	[mm]
$\rho_2$	Menor raio de curvatura encontrado	[mm]
$w$	Metade da espessura da chapa	[mm]
$z$	Distância da chapa em relação ao plano de referência	[mm]
$t$	Variável sobre a linha diametral na qual $z$ foi medido	[mm]
$\Delta z_{\max}$	Empenamento máximo	[mm]
$\Delta z_{\min}$	Empenamento mínimo	[mm]
$p$	Passo da grade padrão	[mm]
$f$	freqüência da grade	[linhas/mm]
$N$	Ordem de franja	-

Símbolo	Significado	Unidade
$\omega$	Ângulo de iluminação da fonte de luz no método moiré de projeção	[°]
I	Intensidade de cada ponto da imagem	Níveis de cinza
$I_F$	Intensidade de fundo	Níveis de cinza
$I_M$	Modulação das franjas	Níveis de cinza
$\phi$	Ângulo de fase	[°]
$\alpha$	Ângulo de varredura	[°]
A	Coeficiente do polinômio quadrático	-

## Lista de Figuras

<i>Figura 1.1 – Geometria típica de uma lâmina de estator.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2.1 – Formação de tensões residuais variáveis ao longo da espessura na laminação de uma chapa.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2 – Efeitos da flexão dos rolos de laminação sobre as tensões residuais longitudinais. ....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3.1 – Corpo de prova – estado inicial.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.2 – Corpo de prova após a estampagem dos furos guia e de medição.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.3 – Medição das distâncias entre centros iniciais do corpo de prova.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.4 – Estampagem do disco central do corpo de prova.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.5 – Medição das distâncias entre centros finais.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.6 – Representação dos parâmetros geométricos para a caracterização de tensões residuais de membrana .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.7 – Tela do software para caracterização de tensões residuais de membrana ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.8 – Dispositivo de apoio do corpo de prova para medições na máquina de medir por coordenadas .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.9 –Esquema indicando as distâncias medidas.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.10 – Identificação das diferentes regiões de coleta do material .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.11 – Gráfico da ovalização x regiões de coleta das amostras .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.12 – Gráfico da variação do raio médio x regiões de coleta das amostras.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.13 – Gráfico da tensão máxima x regiões de coleta das amostras.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.14 – Gráfico da tensão mínima x regiões de coleta das amostras .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 5.1- Arranjo esquemático na geração de franjas pelo método de moiré de projeção (shadow moiré) .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.2 - Mapa de fase obtido com deslocamento de fase com 4 passos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 6.1 – Fluxograma geral do software do sistema computadorizado para medição de tensões residuais de flexão .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 6.3 – Foto externa do dispositivo de moiré .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 6.4 – Foto do sistema de moiré com as portas frontais abertas.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 6.5 – Foto em detalhe da grade de moiré e corpo de prova.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 6.6 – Representação da varredura feita pelo software para o cálculo do empenamento.....</i>	<i>50</i>

<i>Figura 6.7 – Perfil obtido quando o apoio da peça não está paralela à grade de moiré...</i>	<i>51</i>
<i>Figura 6.8 – Remoção da inclinação média do perfil.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 6.9 – Tela do software para caracterização de tensões residuais de flexão .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 6.11 – Vista de topo do corpo de prova medido.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 6.12 - Mapa de fase obtido com peça com erro de planicidade inferior a 0.004 mm .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6.13 – Estimativa dos erros sistemáticos do sistema na região de medição (erros em <math>\mu\text{m}</math>).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 6.14 – Gráfico do empenamento máximo x regiões de coleta das amostras.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.15 – Gráfico da tensão máxima (empenamento) x regiões de coleta das amostras .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.16 – Gráfico da tensão mínima (empenamento) x regiões de coleta das amostras .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.17 – Gráfico do módulo da tensão máxima de membrana x módulo da tensão máxima de flexão .....</i>	<i>63</i>

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Teste de repetitividade - Corpo de prova 1 .....	24
Tabela 3.2 – Teste de repetitividade - Corpo de prova 2 .....	25
Tabela 3.3 – Diferenças dos valores das distâncias em relação às respectivas médias .....	26
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios para a caracterização de tensões residuais de membrana.....	34
Tabela 6.1 - Teste de repetitividade com reposicionamento do corpo de prova .....	56
Tabela 6.2 - Diferenças dos valores dos parâmetros do empenamento em relação às respectivas médias .....	57
Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios para a caracterização de tensões residuais de flexão ..	60
Tabela 7.1 – Valores de repetitividade na determinação dos parâmetros para caracterização de tensões residuais de flexão .....	64
Tabela 7.2 – Valores de repetitividade na determinação dos parâmetros para caracterização de tensões residuais de membrana.....	65



## RESUMO

Chapas finas produzidas por processos convencionais de laminação normalmente apresentam tensões residuais. Quando peças são estampadas a partir de chapas com elevados níveis de tensões residuais freqüentemente são registrados empenamentos e distorções na geometria da peça produzida. Em processos onde há produção em massa de peças estampadas, níveis elevados de tensões residuais na chapa podem levar ao refugo todo um lote de peças produzidas.

Este trabalho apresenta uma técnica desenvolvida para caracterizar tensões residuais em chapas finas. Através de um corpo de prova especialmente concebido, é possível quantificar parâmetros associados aos efeitos das tensões residuais da chapa fina sobre as peças estampadas. São separadamente quantificados parâmetros associados aos empenamentos e distorções da geometria produzida. Técnicas de medição são desenvolvidas para quantificar com elevado grau de automatização e confiabilidade estes parâmetros do corpo de prova.

Um sistema computadorizado é concebido, construído e avaliado. A avaliação da técnica desenvolvida e o desempenho metrológico do sistema implementado são experimentalmente verificados. Exemplos de medições em corpos de prova extraídos de rolos de chapas finas são também apresentados.

## ABSTRACT

Thin plates produced by conventional rolling process usually present residual stress. Frequently when pieces are formed from plates with high levels of residual stress, bending and distortion are observed in the geometry of the manufactured piece. If high levels of residual stresses are present in mass production processes of formed pieces, a large amount of manufactured pieces can be refused.

This work presents an interesting technique developed to characterize residual stress in thin plates. Through an especially developed specimen, it is possible to quantify parameters associated with residual stress in thin plates from forming processes. Parameters associated with bending and geometry distortion are quantified separately. Measurement techniques are developed to quantify these test parameters with high automation and reliability.

A computerized system is designed, built and evaluated. The evaluation of the developed technique and the metrological performance of the system are experimentally verified. We also present some measurement examples from specimens collected from rolls of thin plates.

# CAPÍTULO 1

## Introdução

Este trabalho foi motivado por problemas na produção de lâminas de estatores a partir da estampagem de lâminas de aço. A geometria típica da lâmina de um estator pode ser vista na figura 1.1. Dois efeitos indesejáveis são verificados na peça obtida: a) a ovalização da geometria do círculo interno da lâmina do estator e b) o empenamento da lâmina, que deixa de ser uma peça plana. Quando a ovalização e/ou empenamento das lâminas atingem valores muito elevados, ocorre um comprometimento na qualidade do produto final, que acaba sendo rejeitado.

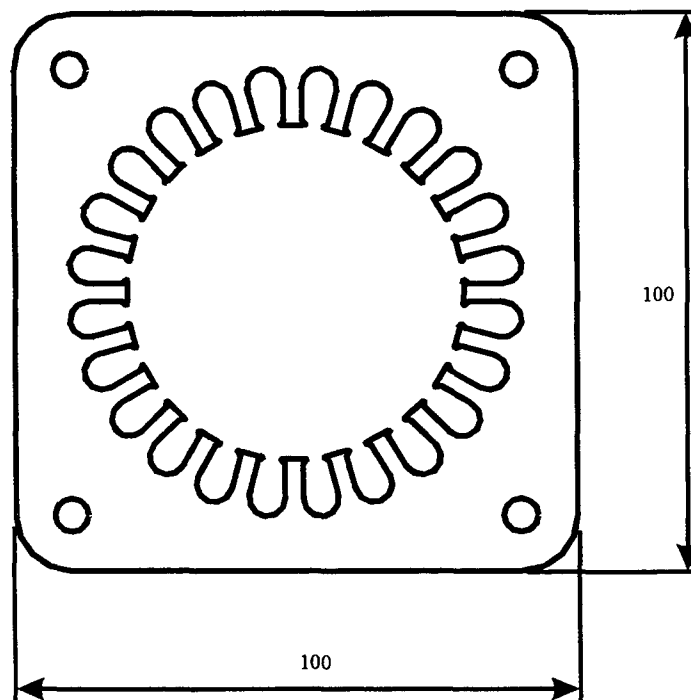


Figura 1.1 – Geometria típica de uma lâmina de estator

Ambos os problemas têm se manifestado na forma de “surto”, de forte correlação com o material utilizado na chapa de aço. Tipicamente, a detecção, tanto do empenamento quanto da ovalização, só se dá quando a lâmina do estator já está pronta. Neste momento, uma grande quantidade de peças já foi produzida e um grande volume de matéria-prima já sofreu algum tipo de beneficiamento. A eventual substituição do material da chapa fina acarreta em severos transtornos na linha de produção.

Há fortes indícios de que dois tipos de distribuições de tensões residuais ( $\sigma_R$ ), já existentes na chapa de aço antes da estampagem, são as causadoras do problema:

- a) tensões residuais variáveis ao longo da superfície da chapa (isto é, da largura e do comprimento da chapa antes da estampagem) estariam provocando o achatamento;
- b) tensões residuais variáveis ao longo da espessura do material estariam provocando o empenamento da chapa.

Neste trabalho procurou-se desenvolver meios que permitam antecipar a manifestação do problema. Através das técnicas aqui desenvolvidas é possível, a partir de uma amostra retirada do material sem beneficiamento, obter parâmetros quantitativos diretamente relacionados com ambos os tipos de tensões residuais, que serão correlacionados com o empenamento e com a ovalização do estator.

Dois grupos de parâmetros quantitativos foram desenvolvidos através da:

- a) técnica para avaliar os efeitos das tensões residuais variáveis sobre a superfície da chapa;
- b) técnica e dispositivo para avaliar os efeitos das tensões residuais agindo ao longo da espessura da chapa.

Os valores obtidos para estes parâmetros não correspondem aos valores absolutos dos efeitos das tensões residuais no estator produzido, mas se prestam como instrumento de comparação entre os diversos materiais utilizados na produção. Isso se deve ao fato de que a geometria do corpo de prova é diferente da geometria do estator e que os modelos matemáticos adotados são aproximados.

O principal objetivo das técnicas desenvolvidas é a sua utilização no recebimento do material, antes de serem feitas as estampagens para o produto final. Desta forma, evita-se que todo um lote de peças seja perdido devido ao problema de distorção da forma do produto. Futuramente, pretende-se utilizá-las na própria usina, onde se faz o processamento da chapa, para que se evite gastos com o transporte da matéria-prima com problemas.

Procurou-se, no desenvolvimento destas técnicas, soluções simples e intuitivas para facilitar a sua utilização por parte do usuário final. Para a caracterização de tensões residuais variáveis no plano, optou-se pela utilização da máquina de medir por coordenadas, por ser um equipamento automatizado e disponível na empresa. Para a caracterização de tensões residuais variáveis ao longo da espessura, desenvolveu-se um dispositivo próprio utilizando a técnica de moiré de projeção. Trata-se de uma técnica óptica na qual se obtém o perfil tridimensional da peça a ser analisada.

O trabalho se inicia com uma revisão sobre tensões residuais, onde são apresentados de forma resumida as origens e os efeitos das tensões residuais em chapas finas. No capítulo 3 é enfocada a técnica desenvolvida para a caracterização de tensões residuais variáveis ao longo da superfície da chapa, o modelamento matemático e resultados experimentais. No capítulo 4 é apresentada a técnica desenvolvida para caracterização de tensões residuais variáveis ao longo da espessura da chapa e o respectivo modelamento matemático adotado. A técnica de medição por moiré de projeção é descrita no capítulo 5. No capítulo 6, é apresentado o projeto do sistema de medição desenvolvido, assim como resultados experimentais para a caracterização das tensões residuais variáveis ao longo da espessura da chapa. No capítulo 7, são apresentadas as conclusões do trabalho.

# **CAPÍTULO 2**

## **Tensões Residuais**

Tensões residuais, por definição, são tensões internas presentes em peças em repouso e sem a presença de carregamentos externos, forças de massa e gradientes de temperatura. São originadas nos processos de fabricação ou beneficiamento da peça. Estes campos de tensões podem ser trativos ou compressivos e em geral são triaxiais e variam de ponto para ponto, principalmente devido à complexidade das geometrias.

Ao se superpor às tensões mecânicas provocadas pelo carregamento, as tensões residuais podem trazer efeitos positivos sobre o desempenho de peças, como aumentar o limite à fadiga, nos casos de tensões superficiais compressivas. Efeitos negativos, como colapso de uma peça antes do término da sua vida útil [1-3], podem ocorrer nos casos em que a soma entre as tensões mecânicas e residuais ultrapassa elevados níveis.

### **2.1 Definições dos tipos de tensões residuais**

Genericamente, classifica-se as tensões residuais em três tipos, de acordo com a extensão da região de abrangência [1-3]:

■ **Tensões residuais de primeira espécie ou macroscópicas:**

São tensões quase homogêneas, distribuídas em grandes áreas do material (ao longo de toda extensão da peça considerada). Estão em equilíbrio sobre todo o seu volume. Qualquer alteração neste equilíbrio, e portanto nas forças e momentos internos à peça, provoca alterações na forma e dimensões da peça.

■ **Tensões residuais de segunda espécie ou microscópicas:**

São quase homogêneas em regiões microscópicas do material, em um grão ou parte do grão do material, e tendem a estar em equilíbrio quando um número suficiente de grãos é considerado. Havendo alteração deste equilíbrio, podem ou não ocorrer alterações macroscópicas nas dimensões do corpo.

■ **Tensões residuais de terceira espécie ou sub-microscópicas:**

São tensões não-homogêneas a nível de regiões sub-microscópicas do material, agindo nas distâncias interatômicas do grão, e são equilibradas em pequenas partes do grão. Não há mudanças macroscópicas nas dimensões do material caso ocorram alterações no equilíbrio destas tensões.

Em materiais metálicos, é tecnologicamente desejável um estado livre de tensões residuais de primeira espécie, uma vez que, dada a sua abrangência em termos de microestrutura, é o tipo de tensão que gera maiores problemas e efeitos conhecidos quando se discute tensões residuais. O valor máximo que podem atingir é o limite de escoamento do material.

## **2.2 Origem das tensões residuais:**

Tensões residuais ocorrem em materiais e componentes mecânicos em decorrência dos vários processos de fabricação [3]:

1. Processos de conformação: estampagem, laminação, embutimento, extrusão, forjamento, prensagem, dobramento, etc.
2. Processos de deposição: soldagem, brasagem, eletrodeposição, recobrimentos, etc.
3. Processos de usinagem: torneamento, fresagem, retificação, furação, etc.
4. Tratamentos térmicos ou processos termoquímicos: têmpera, cementação, nitretação, fundição, tratamentos térmicos por laser ou plasma, etc.

Também podem originar-se durante as fases de instalação de um componente, procedimento de montagem ou sobrecargas ocasionais, bem como em função de desigualdades estruturais em uniões mecânicas, ação do peso próprio e em bimateriais.

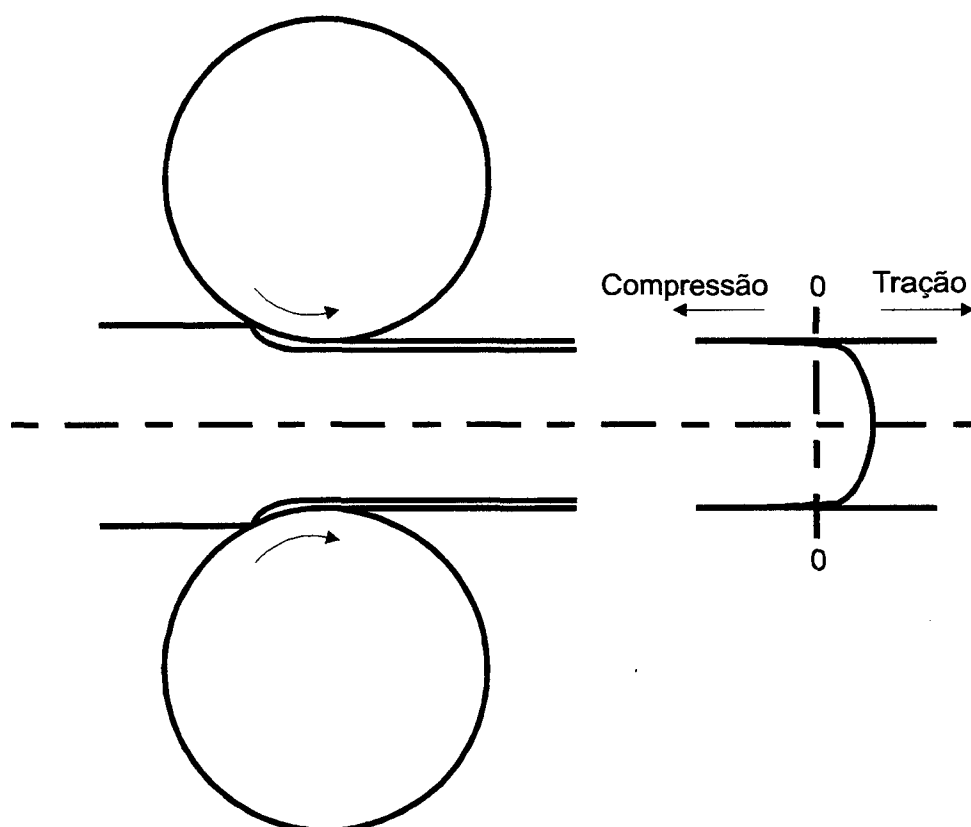
As tensões residuais são extremamente difíceis de serem determinadas. A maneira mais cômoda seria através de métodos analíticos ou numéricos. Porém, a maior dificuldade na aplicação de modelos teóricos consiste na necessidade de se conhecer muito bem a história do material, desde a sua fabricação até os tipos de esforços e carregamentos a que foi submetido, e dispor de sofisticados programas de análise numérica, conforme a complexidade da geometria da peça a ser analisada.

Como na maior parte dos casos isto não é possível, foram desenvolvidos ao longo dos anos uma série de procedimentos experimentais para a quantificação de tensões residuais. Os métodos mais utilizados são os baseados no alívio das tensões pela realização de cortes ou remoção de camadas por usinagem e pela medição do empenamento ou deformação resultante no material. Estes métodos são combinados com formulações matemáticas que consideram a isotropia e homogeneidade do material, e o conhecimento do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson [2-5].



## 2.3 Tensões residuais em chapas

No processo da laminação, o fluxo plástico do material pode afetar as fibras superficiais, que estão em contato com os cilindros laminadores. A deformação não uniforme no material produz um alongamento dos grãos superficiais, ao passo que os grãos no centro permanecem inalterados. Como a chapa laminada deve permanecer um corpo contínuo, as fibras centrais tendem a ser tracionadas pelas fibras superficiais, ao mesmo tempo que estas tendem a ser comprimidas pelas camadas centrais. Ao término do processo, tensões residuais de tração resultam nas fibras centrais, ao passo que tensões residuais de compressão resultam nas superfícies da chapa (figura 2.1) [6,7].

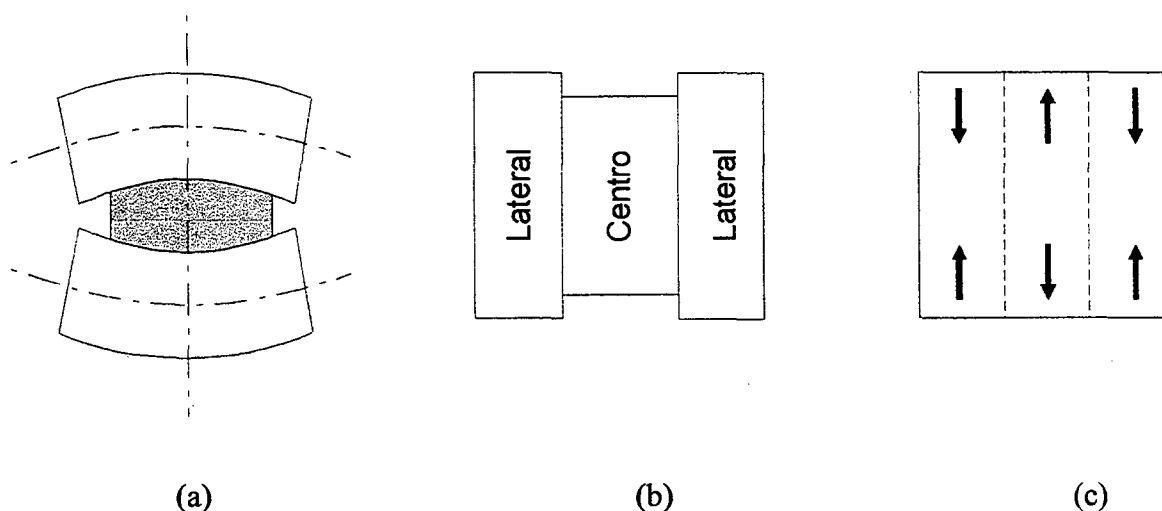


*Figura 2.1 – Formação de tensões residuais variáveis ao longo da espessura na laminação de uma chapa*

Pode-se também gerar tensões residuais durante o processo de resfriamento de chapas quentes (processo de laminação a quente), devido ao intenso gradiente de temperatura da superfície e o centro da chapa. Como as fibras superficiais esfriam mais rápido do que as centrais, haverá uma maior compressão na superfície do que no centro. Esta contração não uniforme induz a formação de tensão de compressão nas fibras centrais e de tração nas fibras superficiais. Como as fibras centrais têm um menor limite de fluência, por terem

maior temperatura, ocorrerá uma compressão plástica, tendendo a encolher toda a peça. Isso causará um estado de tensão residual de compressão na superfície e de tração no seu interior.

A formação de tensões residuais variáveis ao longo da posição transversal (ao longo da largura) da chapa tem origem na pressão de laminação, que faz com que os cilindros se achatem e empenem, fazendo com que todo o laminador se deforme elasticamente. Como mostra a figura 2.2a, as regiões próximas às bordas da chapa laminada têm uma tendência a se alongar longitudinalmente mais do que a região central. Se a chapa fosse cortada em três tiras independentes, o material de cada tira tenderia a se deformar conforme a situação mostrada na figura 2.2b. Entretanto, a placa se mantém como um corpo contínuo e uma série de deformações e esforços internos vão ocorrer para manter a continuidade. Tensões residuais são então desenvolvidas. O resultado é que a região central da placa é tensionada em tração e os extremos em compressão, ambos no sentido da laminação, como mostra a figura 2.2c [8].



*Figura 2.2 – Efeitos da flexão dos rolos de laminação sobre as tensões residuais longitudinais.*

Para minimizar estes efeitos, são normalmente usadas coroas mecânicas, ou seja, os cilindros são modificados de forma a apresentar maior diâmetro no centro do que nas extremidades. Desta forma, durante o processo da laminação, os cilindros fletam e tendem a ser paralelos entre si. Este procedimento corrige os efeitos da flexão do rolo para apenas um valor da carga de laminação, e portanto, não pode ser uma medida eficiente para uma

gama de diferentes condições de laminação. Por isso, muitos laminadores são equipados com bornes hidráulicos (“roll bending”) que permitem a distorção elástica do rolo a fim de corrigir a deflexão sob a influência das diferentes condições de laminação. Se os cilindros têm um abaulamento convexo excessivo, o centro da chapa se alonga mais do que as regiões próximas das bordas. Neste caso, a distribuição das deformações é o inverso da figura 2.2c. Em [8] são apresentadas outras técnicas para se evitar o empenamento dos cilindros laminadores.

Comprova-se estes efeitos no corte em tiras de uma bobina de chapa, onde observa-se que o comprimento das tiras centrais é diferente das tiras laterais.

## 2.4 Efeitos das tensões residuais em peças estampadas a partir de chapas finas

A presença de tensões residuais em chapas finas normalmente dá origem a dois efeitos macroscópicos principais: o empenamento e a distorção da geometria (forma e dimensões) da peça estampada. O empenamento é principalmente provocado pela existência de gradientes de tensões residuais variáveis ao longo da espessura do material. Quando a peça é estampada o equilíbrio das tensões residuais variáveis ao longo da espessura é alterado pelo surgimento das bordas livres. A redistribuição destas tensões dá origem a momentos que tendem a fletir a peça produzida. Por esta razão, esta classe de tensões residuais será aqui denominada de *tensões residuais de flexão* ( $\sigma_{RF}$ ).

As distorções e alterações dimensionais são predominantemente provocadas por não homogeneidades das tensões residuais ao longo da superfície de chapas finas. Regiões onde as tensões são mais intensas quando recortadas pela ferramenta de estampagem tendem a sofrer maior retração ou expansão que regiões onde as tensões são menores. Assim, no conjunto, estes efeitos tendem a alterar a forma e as dimensões da peça produzida, provocando, por exemplo, ovalizações de furos circulares, modificações de ângulos e raios de curvatura. Por sua analogia com a teoria de placas e cascas, estas tensões serão aqui denominadas por *tensões residuais de membrana* ( $\sigma_{RM}$ ).

É necessário um certo cuidado para avaliar os efeitos das tensões residuais em peças estampadas, já que o próprio processo de estampagem introduz novas tensões residuais, que se somam aos efeitos das tensões residuais existentes na chapa antes da estampagem.

## CAPÍTULO 3

### **Caracterização de tensões residuais de membrana**

Um dos principais efeitos visivelmente relacionado à ação de tensões residuais de membrana sobre peças estampadas a partir de chapas finas é a ovalização dos furos produzidos. Furos que deveriam ser idealmente circulares apresentam, após a estampagem, forma elíptica. A orientação do eixo maior desta elipse e a diferença entre os seus raios máximo e mínimo trazem informações acerca do estado de tensões residuais de membrana presente na chapa antes da estampagem, isto é, as direções e as intensidades das tensões residuais principais.

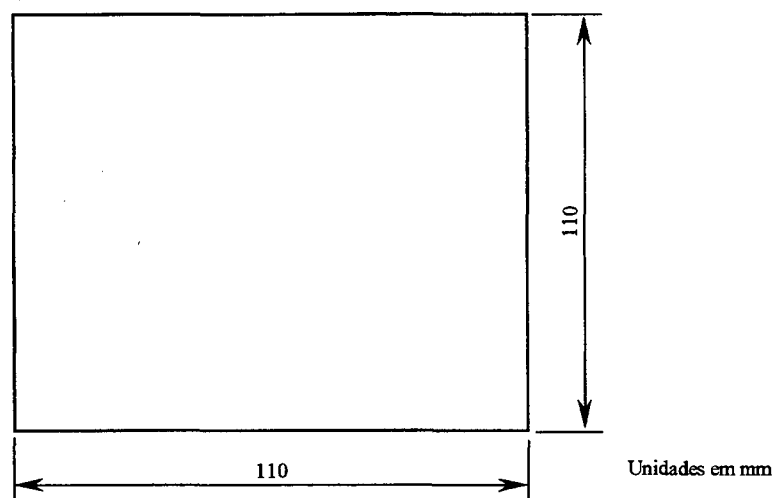
Esta propriedade pode ser explorada para produzir parâmetros quantitativos associados aos níveis de tensões residuais presentes na chapa fina.

Para obter parâmetros associados ao estado de tensões residuais de membrana, foi desenvolvido um corpo de prova especial, extraído da chapa fina em duas etapas por estampagem. Sua concepção permite que alterações geométricas do corpo de prova, decorrentes da remoção de um disco central, realizada na segunda etapa do processo de estampagem, sejam precisamente medidas e diretamente relacionadas ao nível de tensões residuais de membrana presente na chapa.

A geometria do corpo de prova foi concebida para, além de viabilizar a medição das tensões residuais de membrana, minimizar custos e facilitar a sua confecção através de uma ferramenta de estampagem. Os processos de confecção e medição são apresentados a seguir:

### Passo 1: chapa bruta

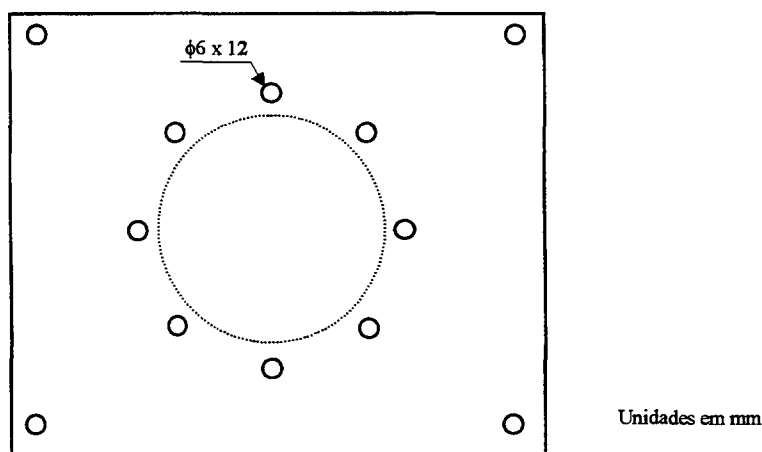
Parte-se de uma chapa de aço nas condições onde se desejam caracterizar as tensões residuais de membrana ( $\sigma_{RM}$ ), com dimensões apropriadas para ser trabalhada na prensa de estampagem.



*Figura 3.1 – Corpo de prova – estado inicial*

### b) Passo 2: estampagem dos furos

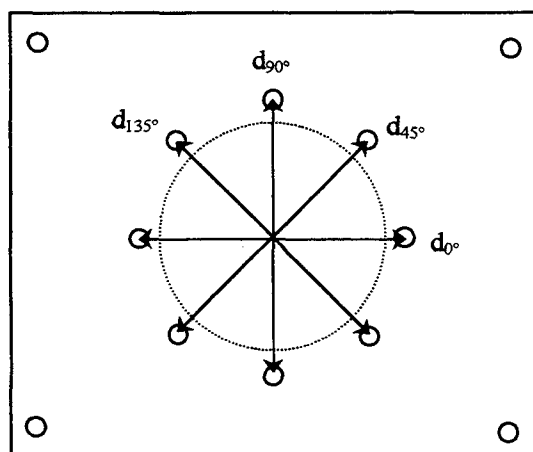
Através de uma ferramenta especial, em uma primeira etapa são estampados na chapa, além do contorno do quadrado externo, dois conjuntos de furos: quatro furos guias externos e oito furos centrais orientados com passos angulares de  $45^\circ$ .



*Figura 3.2 – Corpo de prova após a estampagem dos furos guia e de medição*

c) Passo 3: medição das distâncias de referência

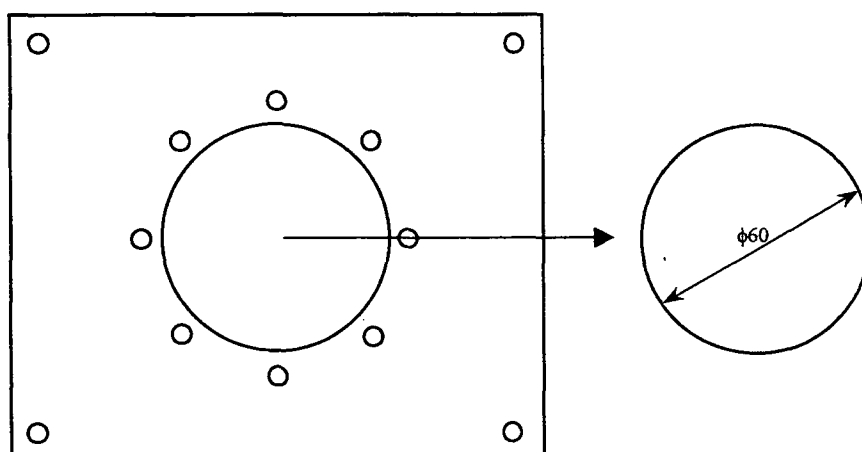
As distâncias  $d_{0^\circ}$ ,  $d_{45^\circ}$ ,  $d_{90^\circ}$ ,  $d_{135^\circ}$ , indicadas na figura, são medidas nesta condição.



*Figura 3.3 - Medição das distâncias entre centros iniciais do corpo de prova*

d) Passo 4: recorte do disco

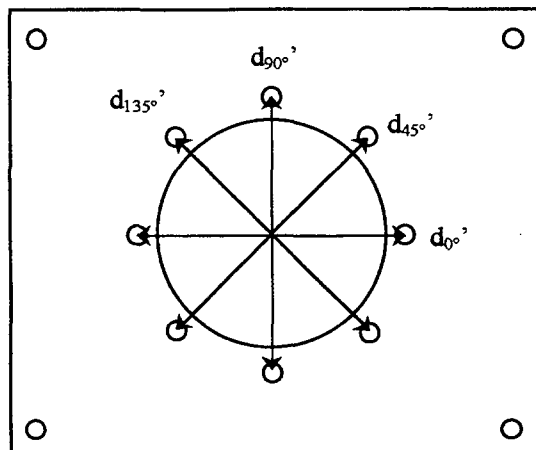
Através de um segundo estágio de estampagem, e tendo por referência os quatro furos guia, um disco é recortado da região central na forma indicada na figura, resultando em um furo na região central do corpo de prova.



*Figura 3.4 - Estampagem do disco central do corpo de prova*

e) *Passo 5: medição das distâncias finais*

As distâncias  $d_{0^\circ}$ ,  $d_{45^\circ}$ ,  $d_{90^\circ}$ ,  $d_{135^\circ}$ , indicadas na figura são novamente medidas.



*Figura 3.5 - Medição das distâncias entre centros finais*

f) *Passo 6: quantificação do efeito das tensões residuais de membrana ( $\sigma_{RM}$ )*

Em função das diferenças entre as quatro distâncias entre centros iniciais e das quatro distâncias entre centros finais, isto é,  $f(d_{0^\circ}, d_{0^\circ}^{\prime}, d_{45^\circ}, d_{45^\circ}^{\prime}, d_{90^\circ}, d_{90^\circ}^{\prime}, d_{135^\circ}, d_{135^\circ}^{\prime})$ , calcula-se um parâmetro associado ao nível médio de tensões residuais de membrana. Informações relacionadas com a direção principal e com as intensidades das tensões principais são determinadas.

Como trata-se de uma medição diferencial, eventuais erros de forma nos furos de medição e da geometria inicial do corpo de prova não afetam os resultados.



### 3.1 Modelamento matemático

Para exprimir quantitativamente os efeitos das tensões residuais de membrana sobre peças estampadas a partir de chapas finas, foram definidos três parâmetros geométricos com os quais são estimadas as tensões residuais equivalentes.

Construtivamente, os quatro pares de furos de medição estão sobre um mesmo círculo de referência. Sob o efeito do alívio das tensões residuais de membrana, provocado pela remoção do disco central do corpo de prova, o círculo de referência se deforma, transformando-se em uma elipse. Ao serem precisamente medidas estas deformações em quatro diâmetros defasados de  $45^\circ$ , é possível calcular os raios máximo e mínimo da elipse e a diferença entre o seu raio médio e o do círculo de referência e a orientação do eixo maior da elipse obtida.

Para calcular estes parâmetros é necessário partir da equação que, em coordenadas polares, representa a diferença entre o raio da elipse correspondente à borda deformada do furo e o círculo de referência original:

$$\Delta r(\theta) = \Delta R_{\text{med}} + \Theta \cdot \cos(2\gamma + 2\theta) \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta r(\theta)$  é a variação do raio em função do ângulo polar

$\Delta R_{\text{med}}$  é a variação média do raio

$\Theta$  é a ovalização máxima

$\gamma$  é o ângulo da direção de máxima ovalização

A figura 3.6 mostra o gráfico cartesiano e polar da equação 3.1 e uma indicação dos seus parâmetros.

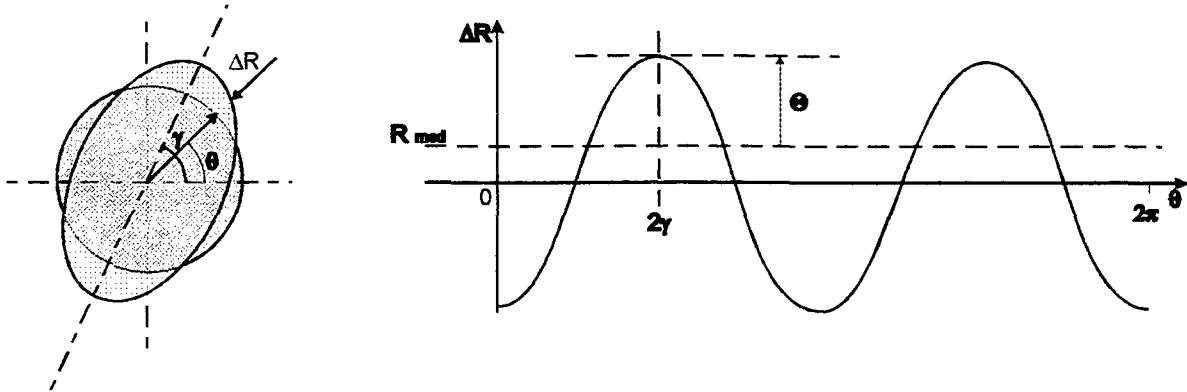


Figura 3.6 – Representação dos parâmetros geométricos para a caracterização de tensões residuais de membrana

Quando escrita para as posições angulares  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$  a equação 3.1 assume a forma:

$$\Delta R_{med} + \Theta \cdot \cos(2\gamma) = \frac{\Delta d_0}{2} \quad (3.2a)$$

$$\Delta R_{med} + \Theta \cdot \cos(2\gamma + 90^\circ) = \frac{\Delta d_{45}}{2} \quad (3.2b)$$

$$\Delta R_{med} + \Theta \cdot \cos(2\gamma + 180^\circ) = \frac{\Delta d_{90}}{2} \quad (3.2c)$$

$$\Delta R_{med} + \Theta \cdot \cos(2\gamma + 270^\circ) = \frac{\Delta d_{135}}{2} \quad (3.2d)$$

onde:

$\Delta d_0$ ,  $\Delta d_{45}$ ,  $\Delta d_{90}$  e  $\Delta d_{135}$  são as variações dos diâmetros medidos antes e depois da retirada do disco, nas posições  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$  respectivamente.

Estas equações podem ser simplificadas para:

$$\Delta R_{med} + \Theta \cdot \cos(2\gamma) = \frac{\Delta d_0}{2} \quad (3.3 a)$$

$$\Delta R_{med} - \Theta \cdot \sin(2\gamma) = \frac{\Delta d_{45}}{2} \quad (3.3 b)$$

$$\Delta R_{med} - \Theta \cdot \cos(2\gamma) = \frac{\Delta d_{90}}{2} \quad (3.3 \text{ c})$$

$$\Delta R_{med} + \Theta \cdot \sin(2\gamma) = \frac{\Delta d_{135}}{2} \quad (3.3 \text{ d})$$

A quantificação dos parâmetros *variação do raio médio*, *ovalização máxima* e *direção de máxima ovalização* são melhor detalhados a seguir [9,10].

a) Variação do raio médio:

A variação do raio médio pode ser calculada pela metade da variação média dos quatro diâmetros. Este mesmo resultado pode ser obtido a partir da soma das quatro equações 3.3:

$$\Delta R_{med} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta d_0 + \Delta d_{45} + \Delta d_{90} + \Delta d_{135}}{4} \right) \quad (3.4)$$

Este parâmetro está relacionado com o valor médio das tensões residuais de membrana existentes na chapa fina.

b) Ovalização máxima (diferença entre o raio máximo e o raio médio):

A ovalização ( $\Theta$ ) está associada com a mudança de forma do disco central. Numericamente corresponde à metade da diferença entre o maior diâmetro e o diâmetro médio da forma elíptica assumida pelo círculo de referência do corpo de prova após a retirada do disco central.

A ovalização pode ser calculada a partir das equações 3.3. Somando-se as equações 3.3a e 3.3c e as equações 3.3b e 3.3d e elevando-se ao quadrado, obtém-se:

$$[2 \cdot \Theta \cdot \cos(2\gamma)]^2 = \left( \frac{\Delta d_0}{2} - \frac{\Delta d_{90}}{2} \right)^2 \quad \text{e} \quad [2 \cdot \Theta \cdot \sin(2\gamma)]^2 = \left( \frac{\Delta d_{45}}{2} - \frac{\Delta d_{135}}{2} \right)^2$$

Somando-se as equações acima e isolando-se  $\Theta$ , obtém-se:

$$\Theta = \frac{1}{4} \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \quad (3.5)$$

A ovalização será mais intensa quanto maior for a diferença entre as tensões residuais principais de membrana presentes na chapa.

### c) Direção da máxima ovalização

A direção de ovalização corresponde ao ângulo que o eixo maior da elipse forma com o eixo horizontal do corpo de prova, isto é, com o eixo 1-1. O sentido de crescimento do ângulo é o trigonométrico, isto é, anti-horário.

Este parâmetro corresponde ao ângulo  $\gamma$  da equação 3.1 e pode ser determinado a partir das equações 3.3:

Subtraindo-se as equações 3.3a e 3.3c e as equações 3.3b e 3.3d, obtém-se:

$$2 \cdot \cos(2 \cdot \gamma) \cdot \Theta = \frac{\Delta d_0 - \Delta d_{90}}{2} \quad \text{e} \quad -2 \cdot \sin(2 \cdot \gamma) \cdot \Theta = \frac{\Delta d_{45} - \Delta d_{135}}{2}$$

Dividindo-se uma equação pela outra, e isolando-se  $\gamma$ , obtém-se a equação da direção de máxima ovalização:

$$\gamma = \frac{1}{2} \text{atan} \left( \frac{\Delta d_{135} - \Delta d_{45}}{\Delta d_0 - \Delta d_{90}} \right) \quad (3.6)$$

Este conjunto de parâmetros quantitativos possui fácil interpretação geométrica e podem estar diretamente correlacionado com os efeitos das tensões residuais. Para estabelecer um programa de controle de tensões residuais de membrana em chapas finas estes parâmetros

podem se bastar por si só. Porém, entende-se como conveniente associar estes parâmetros a níveis equivalentes de tensões residuais.

Para o cálculo das tensões residuais equivalentes, foi desenvolvido um modelamento matemático de forma a associar os parâmetros geométricos (ovalização, direção de ovalização e variação do raio médio) com os valores das tensões principais e o ângulo principal.

Em coordenadas polares, o campo de deslocamentos radiais gerado em torno de um furo passante em uma superfície infinita sujeita a tensões residuais uniformes [14] assume a seguinte forma [11-13]:

$$U_r(r, \theta) = -\frac{1+\nu}{2E} r \left\{ \left[ \left( \frac{R_0}{r} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left( \frac{R_0}{r} \right)^2 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) - (\sigma_1 + \sigma_2) \left( \frac{R_0}{r} \right)^2 \right\} \quad (3.7)$$

Onde:

$U_r(r, \theta)$  é o deslocamento radial [ $\mu\text{m}$ ]

$r$  e  $\theta$  são as coordenadas polares

$\nu$  é o coeficiente de Poisson do material

$E$  é o módulo de elasticidade do material [MPa]

$R_0$  é o raio do furo executado na peça

$\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais máxima e mínima [MPa]

$\beta$  é o ângulo das direções principais [rad]

Esta equação pode ser reescrita como:

$$U_r(r, \theta) = A(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) + B(r)(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.8)$$

onde:

$$A(r) = -\frac{1+\nu}{2E} r \left[ \left( \frac{R_0}{r} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left( \frac{R_0}{r} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

$$B(r) = \frac{1+\nu}{2E} r \left( \frac{R_0}{r} \right)^2 \quad (3.10)$$

A equação do campo de deslocamentos radiais (equação 3.8) para um valor fixo do raio possui exatamente a mesma forma da equação 3.1, que corresponde à diferença entre a elipse e o raio de referência. Assim é possível fazer uma analogia entre estas equações, associando a soma das tensões residuais principais com a variação do raio médio e a diferença entre as tensões residuais principais com a ovalização, ou seja:

$$\Delta R_{\text{med}} = B(r) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{e}$$

$$\Theta = A(r) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Resolvendo o sistema de equações acima, obtém-se:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_m}{B(r)} + \frac{\Theta}{A(r)} \right) \quad (3.11)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_m}{B(r)} - \frac{\Theta}{A(r)} \right) \quad (3.12)$$

É importante salientar que os valores das tensões residuais calculados desta forma são valores equivalentes, uma vez que a teoria que rege a equação 3.7 só é aplicável para placas “infinitas”, isto é, com dimensões lineares muito maiores que o diâmetro do disco central removido. Entretanto, o parâmetro obtido, mesmo que não represente numericamente o valor das tensões residuais de fato existentes na chapa, é ainda um parâmetro que pode ser diretamente relacionado com os efeitos das tensões residuais em chapas finas e portanto, pode ser utilizado para comparações entre chapas finas.

### 3.2 Software para a caracterização das tensões residuais de membrana

Foi desenvolvido e implementado um software para facilitar o cálculo dos parâmetros geométricos e os valores das tensões residuais equivalentes. Os dados de entrada são alguns

parâmetros de identificação do ensaio e do material, além das distâncias  $d_{0^\circ}$ ,  $d_{45^\circ}$ ,  $d_{90^\circ}$  e  $d_{135^\circ}$  antes e após a retirada do disco central. A tela do software é mostrada na figura 3.7.

**OVALIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA - Versão 2.11 - 24/06/1998**

**UFSC / CERTI / EMBRACO**

**Identificação do Ensaio**

Lâmina 15

Executor: CK Data: 24/06/98

Observações: Número do sliter e largura não foram informados

**Identificação do Material**

Fornecedor: Usiminas Material: 45/500

Número da bobina: Número do sliter: 1 Largura: 110

**Distâncias iniciais**

1-1	70.0108
2-2	70.0056
3-3	69.9987
4-4	70.0022

**Distâncias finais**

1-1	70.0029
2-2	70.0086
3-3	70.0027
4-4	70.0043

**Resultados**

**Geometria**

Ovalização: 3.0 x 0,001 mm

Varição do raio médio: 0.1 x 0,001 mm

Direção da ovalização: 87.8 °

**Tensões residuais equivalentes**

Tensão máxima: 8.9 MPa

Tensão mínima: -7.0 MPa

Ângulo principal: 87.8 °

**Gráfico**

Arquivo atual: Nenhum

Abre novo arquivo

Configura Impressora

Calcula Imprime Salva medição Limpa campos

FIM

Figura 3.7 – Tela do software para caracterização de tensões residuais de membrana

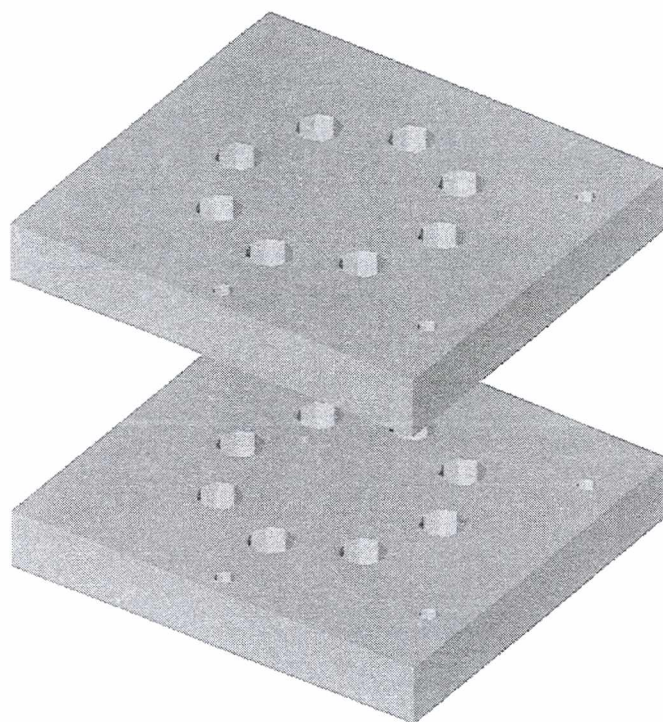
### 3.3 Medição das distâncias entre centros

Para a realização da medição das distâncias entre centros, foi empregada uma máquina de medir por coordenadas. Para isso, foi feito um programa específico, de forma a realizar as medições de forma automatizada. Realizando-se uma análise prévia da repetitividade do sistema, detectou-se que o empenamento do corpo de prova causava grandes dispersões das medições. Para minimizar a ocorrência deste problema, construiu-se um acessório de medição para os corpos de prova, de forma a apoiar a lâmina tanto na face superior quanto na inferior (figura 3.8), minimizando a flexão do corpo de prova.

Durante as medições, foi utilizado um apalpador cilíndrico, de forma a tangenciar as bordas dos furos. Para verificar a melhor forma de determinar a coordenada do centro de cada furo



de medição, e a influência do acabamento das bordas estampadas, foi realizado um teste de repetitividade, apresentado a seguir.

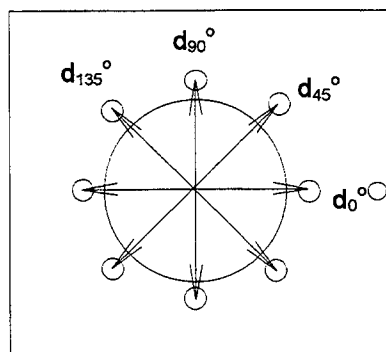


*Figura 3.8 – Dispositivo de apoio do corpo de prova para medições na máquina de medir por coordenadas*

### 3.3.1 Teste de repetitividade na máquina de medir por coordenadas

Dois corpos de prova foram repetidamente medidos na máquina de medir por coordenadas Zeiss (Fundação CERTI) como forma de avaliar a influência da estratégia de medição e do acabamento das bordas dos furos de medição do corpo de prova sobre a repetibilidade das medições da ovalização. As distâncias entre os centros dos furos  $d_0^\circ$ ,  $d_{45^\circ}$ ,  $d_{90^\circ}$  e  $d_{135^\circ}$  (figura 3.9) foram medidas.





*Figura 3.9 –Esquema indicando as distâncias medidas*

Os dois corpos de prova avaliados eram do mesmo material. Para a determinação das distâncias  $d_0^\circ$ ,  $d_{45^\circ}$ ,  $d_{90^\circ}$  e  $d_{135^\circ}$ , primeiramente as coordenadas dos centros de cada furos são calculadas. Três estratégias de medição foram avaliadas: apalpação em 4 pontos, apalpação em 8 pontos e um “scanning” do furo, ou seja, percorreu-se o apalpador ao longo de toda borda do furo.

Durante as medições, foi utilizado o dispositivo da figura 3.8, para evitar que o empenamento da lâmina exercesse forte influência na determinação das quatro distâncias. Foram realizadas ao todo 3 medições para cada caso, apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2. Entre cada medição, os corpos de prova eram retirados e posicionados novamente no dispositivo.

**Medição em 4 pontos**

	Distâncias [mm]			
Medição	$d_0^\circ$	$d_{45^\circ}$	$D_{90^\circ}$	$d_{135^\circ}$
1	69,9991	69,9996	69,9963	70,0036
2	70,0007	69,9982	69,9953	70,0046
3	69,9983	70,0005	69,9979	70,0034
Média	69,9994	69,9994	69,9965	70,0039
Desv. Padr.	0,0012	0,0012	0,0013	0,0006

**Medição em 8 pontos**

	Distâncias [mm]			
Medição	$d_0^\circ$	$d_{45^\circ}$	$d_{90^\circ}$	$d_{135^\circ}$
1	69,9978	70,0004	69,9949	70,0079
2	69,9990	69,9983	69,9955	70,0084
3	69,9998	69,9985	69,9968	70,0059
Média	69,9989	69,9991	69,9957	70,0074
Desv. Padr.	0,0010	0,0012	0,0010	0,0013

**Scanning**

	Distâncias [mm]	
Medição	$d_0^\circ$	$d_{90^\circ}$
1	70,0005	69,9986
2	70,0018	69,9978
3	70,0029	69,9950
Média	70,0017	69,9971
Desv. Padr.	0,0012	0,0019

Tabela 3.1 – Teste de repetitividade - Corpo de prova 1

**Medição em 4 pontos**

	Posição			
Medição	$d_0^\circ$	$d_{45^\circ}$	$d_{90^\circ}$	$d_{135^\circ}$
1	70,0016	70,0073	69,9952	70,0021
2	70,0014	70,0068	69,9954	70,0015
3	70,0002	70,0075	69,9958	70,0022
Média	70,0011	70,0072	69,9955	70,0019
Desv. Padr.	0,0008	0,0004	0,0003	0,0004

**Medição em 8 pontos**

	Posição			
Medição	$d_0^\circ$	$d_{45^\circ}$	$d_{90^\circ}$	$d_{135^\circ}$
1	70,0006	70,0071	69,996	70,0037
2	70,0003	70,008	69,9959	70,0035
3	69,9998	70,0069	69,9964	70,0031
Média	70,0002	70,0073	69,9961	70,0034
Desv. Padr.	0,0004	0,0006	0,0003	0,0003

**Scanning**

	Posição
Medição	$d_0^\circ$
1	70,0029
2	70,0030
3	70,0027
Média	70,0029
Desv. Padr.	0,0002

Tabela 3.2 – Teste de repetitividade - Corpo de prova 2

Observou-se pouca variação do desvio padrão entre as medições de 4 e 8 pontos. E no caso do corpo de prova 1, o desvio padrão do “scanning” foi até maior do que nas medições de 4 e 8 pontos. Uma explicação para isto seria uma provável imperfeição na geometria da borda do furo, que durante o “scanning” foi detectada e nas medições em 4 e 8 pontos, coincidentemente, não foi.

Conclui-se que é suficiente fazer as medições apalpando o furo em 4 pontos, o que reduz o tempo de medição sem comprometer a incerteza dos resultados.

### 3.4 Estimativa do valor da repetitividade na medição dos parâmetros da ovalização

A parcela sistemática do erro de medição da máquina de medir por coordenadas, utilizada para medir a distância absoluta entre os centros, pode chegar a alguns micrometros. Entretanto, espera-se que a mesma parcela sistemática esteja presente nas duas medições, antes e após a retirada do disco central, e que esta seja praticamente eliminada quando a variação destas distâncias for calculada por subtração.

A estimativa da incerteza de medição na determinação da variação das distâncias foi então baseada apenas na parcela aleatória, utilizando as medidas realizadas em quatro pontos dos dois corpos de prova. Como foram realizadas apenas três medições para cada diâmetro, optou-se pela análise das variações de cada grupo de medidas em relação às respectivas médias.

As diferenças dos valores em relação às respectivas médias são apresentadas a seguir:

	Corpo de prova 1 (medição em 4 pontos) [mm]				Corpo de prova 2 (medição em 4 pontos) [mm]			
Medição	$d_0^\circ - d_0^\circ \text{méd.}$	$d_{45}^\circ - d_{45}^\circ \text{méd.}$	$d_{90}^\circ - d_{90}^\circ \text{méd.}$	$d_{135}^\circ - d_{135}^\circ \text{méd.}$	$d_0^\circ - d_0^\circ \text{méd.}$	$d_{45}^\circ - d_{45}^\circ \text{méd.}$	$d_{90}^\circ - d_{90}^\circ \text{méd.}$	$d_{135}^\circ - d_{135}^\circ \text{méd.}$
1	-0.0003	0.0002	-0.0002	-0.0003	0.0005	0.0001	-0.0003	0.0002
2	0.0013	-0.0012	-0.0012	0.0007	0.0003	-0.0004	-0.0001	-0.0004
3	-0.0011	0.0011	0.0014	-0.0005	-0.0009	0.0003	0.0003	0.0003

Tabela 3.3 – Diferenças dos valores das distâncias em relação às respectivas médias

O desvio padrão considerando todos os valores da tabela 3.3 é 1  $\mu\text{m}$ . Para este caso, tem-se 16 graus de liberdade (2 graus de liberdade para cada diferença da tabela 3.3), e o coeficiente t-student para 95% de confiabilidade é de 2,11 [15]. A repetitividade para a medição do diâmetro é dada pela equação 3.13:

$$Re_d = \pm t \cdot DP_{\Delta d} \quad (3.13)$$

Onde:

$Re_d$  é a repetitividade da medição do diâmetro

$t$  é o coeficiente de t-student para 95% de confiabilidade

$DP_{\Delta d}$  é o desvio padrão das diferenças dos valores das distâncias em relação às respectivas médias

O valor obtido para a repetitividade da medição do diâmetro foi de  $\pm 0,0020\text{mm}$ .

A repetitividade para a variação do diâmetro, ou seja, para a diferença entre as medições do diâmetro antes e depois da retirada do disco central, pode ser estimada a partir das regras de propagação de incertezas [16]. No caso, considerando que ambas as medições foram efetuadas pelo mesmo sistema de medição, usando-se o modelo apropriado para grandezas estatisticamente dependentes, a repetitividade será estimada com duas vezes o valor da repetitividade da medição de cada diâmetro, ou seja:

$$Re_{\Delta d} = 2 \cdot Re_d \quad (3.14)$$

A repetitividade para a medição da variação do diâmetro será portando de  $\pm 0,0040\text{mm}$

Este valor será assumido como sendo o mesmo para a repetitividade da variação de todos os diâmetros medidos, ou seja:

$$Re_{\Delta d_0} = Re_{\Delta d_{45}} = Re_{\Delta d_{90}} = Re_{\Delta d_{135}} = \pm 0,0040\text{mm}$$

A seguir, calcula-se a repetitividade dos parâmetros da ovalização.

Para estes cálculos, serão assumidos valores típicos para as variações dos diâmetros:

$$\Delta d_0 = -0,0107 \text{ mm}, \Delta d_{45} = 0,0028 \text{ mm}, \Delta d_{90} = 0,0317 \text{ mm}, \Delta d_{135} = 0,0002 \text{ mm}.$$

a)  $\Delta R_{med}$

$$\Delta R_{med} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta d_0 + \Delta d_{45} + \Delta d_{90} + \Delta d_{135}}{4} \right)$$

A repetitividade para a variação do raio médio é dada por:

$$Re(\Delta R_{med}) = \left| \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_0} \right| \cdot Re_{\Delta d_0} + \left| \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_{45}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{45}} + \left| \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_{90}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_{135}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{135}}$$

Onde:

$$\frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_0} = \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_{45}} = \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_{90}} = \frac{\partial \Delta R_{med}}{\partial \Delta d_{135}} = \frac{1}{8}$$

Substituindo os valores, obtém-se:

$$Re(\Delta R_{med}) = \pm 0,0020 \text{ mm}$$

b)  $\Theta$

$$\Theta = \frac{1}{4} \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}$$

A repetitividade para a ovalização é dada por:

$$Re(\Theta) = \left| \frac{\partial \Theta}{\partial \Delta d_0} \right| \cdot Re_{\Delta d_0} + \left| \frac{\partial \Theta}{\partial \Delta d_{45}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{45}} + \left| \frac{\partial \Theta}{\partial \Delta d_{90}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{\partial \Theta}{\partial \Delta d_{135}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{135}}$$

Resolvendo-se as derivadas parciais tem-se:

$$Re(\Theta) = \left| \frac{\Delta d_0 - \Delta d_{90}}{4 \cdot \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}} \right| \cdot Re_{\Delta d_0} + \left| \frac{\Delta d_{45} - \Delta d_{135}}{4 \cdot \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{45}} \\ + \left| \frac{\Delta d_{90} - \Delta d_0}{4 \cdot \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{\Delta d_{135} - \Delta d_{45}}{4 \cdot \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{135}}$$

Substituindo os valores, obtém-se:

$$\text{Re}(\Theta) = \pm 0,0021 \text{mm}$$

c)  $\gamma$

$$\gamma = \frac{1}{2} \text{atan} \left( \frac{\Delta d_{135} - \Delta d_{45}}{\Delta d_0 - \Delta d_{90}} \right)$$

A repetitividade para a direção de máxima ovalização é dada por:

$$\text{Re}(\gamma) = \left| \frac{\partial \gamma}{\partial \Delta d_0} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_0} + \left| \frac{\partial \gamma}{\partial \Delta d_{45}} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{45}} + \left| \frac{\partial \gamma}{\partial \Delta d_{90}} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{\partial \gamma}{\partial \Delta d_{135}} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{135}}$$

Resolvendo-se as derivadas parciais, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\gamma) = & \left| -\frac{1}{2} \frac{(\Delta d_{135} - \Delta d_{45})}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 \cdot \left[ 1 + \frac{(\Delta d_{135} - \Delta d_{45})^2}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2} \right]} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_0} + \left| \frac{1}{2} \frac{1}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90}) \cdot \left[ 1 + \frac{(\Delta d_{135} - \Delta d_{45})^2}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2} \right]} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{45}} \\ & + \left| \frac{1}{2} \frac{(\Delta d_{135} - \Delta d_{45})}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 \cdot \left[ 1 + \frac{(\Delta d_{135} - \Delta d_{45})^2}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2} \right]} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{1}{2} \frac{1}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90}) \cdot \left[ 1 + \frac{(\Delta d_{135} - \Delta d_{45})^2}{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2} \right]} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{135}} \end{aligned}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$\text{Re}(\gamma) = \pm 0,1 \text{rad} \quad (5,7^\circ)$$

d)  $\sigma_1$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_m}{B(r)} + \frac{\Theta}{A(r)} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\left( \frac{\Delta d_0 + \Delta d_{45} + \Delta d_{90} + \Delta d_{135}}{8} \right)}{B(r)} + \frac{\frac{1}{4} \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}}{A(r)} \right)$$

A repetitividade para o valor da tensão máxima é calculada considerando-se fixos os parâmetros  $A(r)$  e  $B(r)$ , das equações 3.9 e 3.10. Serão adotados os seguintes valores típicos para a estimativa do valor da repetitividade:

$$E = 210\,000 \text{ MPa} \quad \nu = 0,27 \quad R_0 = 30 \text{ mm} \quad r = 35 \text{ mm}$$

$$Re(\sigma_1) = \left| \frac{\partial \sigma_1}{\partial \Delta d_0} \right| \cdot Re_{\Delta d_0} + \left| \frac{\partial \sigma_1}{\partial \Delta d_{45}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{45}} + \left| \frac{\partial \sigma_1}{\partial \Delta d_{90}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{\partial \sigma_1}{\partial \Delta d_{135}} \right| \cdot Re_{\Delta d_{135}}$$

Resolvendo-se as derivadas parciais, tem-se:

$$\begin{aligned} Re(\sigma_1) = & \left| \frac{1}{16} \cdot \frac{2 \cdot B(\Delta d_0 - \Delta d_{90}) + \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot A}{\sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot (A \cdot B)} \right| \cdot Re_{\Delta d_0} \\ & + \left| \frac{1}{16} \cdot \frac{2 \cdot B(\Delta d_{135} - \Delta d_{45}) + \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot A}{\sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot (A \cdot B)} \right| \cdot Re_{\Delta d_{45}} \\ & + \left| \frac{1}{16} \cdot \frac{2 \cdot B(\Delta d_0 - \Delta d_{90}) + \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot A}{\sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot (A \cdot B)} \right| \cdot Re_{\Delta d_{90}} \\ & + \left| \frac{1}{16} \cdot \frac{2 \cdot B(\Delta d_{135} - \Delta d_{45}) + \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot A}{\sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2} \cdot (A \cdot B)} \right| \cdot Re_{\Delta d_{135}} \end{aligned}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$Re(\sigma_1) = \pm 13 \text{ MPa}$$

d)  $\sigma_2$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_m}{B(r)} - \frac{\Theta}{A(r)} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\left( \frac{\Delta d_0 + \Delta d_{45} + \Delta d_{90} + \Delta d_{135}}{8} \right)}{B(r)} - \frac{\frac{1}{4} \sqrt{(\Delta d_0 - \Delta d_{90})^2 + (\Delta d_{45} - \Delta d_{135})^2}}{A(r)} \right)$$

A repetitividade para a tensão mínima é calculada de maneira idêntica à da tensão máxima.



$$\text{Re}(\sigma_2) = \left| \frac{\partial \sigma_2}{\partial \Delta d_0} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_0} + \left| \frac{\partial \sigma_2}{\partial \Delta d_{45}} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{45}} + \left| \frac{\partial \sigma_2}{\partial \Delta d_{90}} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{90}} + \left| \frac{\partial \sigma_2}{\partial \Delta d_{135}} \right| \cdot \text{Re}_{\Delta d_{135}}$$

Realizando as derivadas e substituindo os valores, obtém-se:

$$\text{Re}(\sigma_2) = \pm 13 \text{MPa}$$

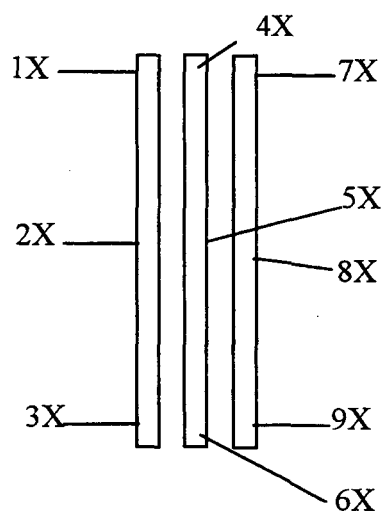
A repetitividade do ângulo das tensões principais  $\beta$  será a mesma do ângulo de máxima ovalização  $\gamma$ , já que são calculadas através da mesma equação.

Vale ressaltar que os valores da repetitividade dos parâmetros dependem dos valores de  $\Delta d_0$ ,  $\Delta d_{45}$ ,  $\Delta d_{90}$  e  $\Delta d_{135}$ , atribuídos. Porém, realizando-se os cálculos para outros valores, verificou-se que a repetitividade não teve variação significativa, a não ser para a direção de máxima ovalização (e conseqüentemente para o ângulo das tensões principais). Quando foram substituídos valores de  $\Delta d_0$ ,  $\Delta d_{45}$ ,  $\Delta d_{90}$  e  $\Delta d_{135}$  que resultavam numa ovalização ( $\Theta$ ) muito pequena, da ordem de 2  $\mu\text{m}$ , verificou-se que a repetitividade do ângulo resulta em valores muito elevados, da ordem de 60°. Isso ocorreu pois nos casos em que há pouca ovalização, o seu ângulo não fica bem definido. Um caso extremo ocorre quando há uma ovalização nula, não existindo, portanto, uma direção de máxima ovalização. Neste caso, as equações divergem, resultando em valores de repetitividade artificialmente muito elevados.

### 3.5 Ensaios Realizados

Foi realizada uma série de ensaios com um mesmo material, sendo este coletado em diferentes locais de uma bobina de chapas.

A bobina foi dividida em 3 tiras. Corpos de prova foram coletados em 3 locais diferentes em cada tira: no começo, no meio e no final da bobina. Para fins de identificação da origem dos corpos de prova, a cada região das tiras foi associado um número diferente, de acordo com a figura 3.9. Réplicas de corpos de prova retirados da mesma região foram identificadas por diferentes letras. Desta forma, os corpos de prova foram identificados com um número seguido por uma letra, para diferenciar os corpos de prova de uma mesma região.



Onde “X” são letras de A a H

*Figura 3.10 – Identificação das diferentes regiões de coleta do material*

Os corpos de prova foram extraídos e ensaiados em conformidade com a metodologia apresentada. A seguir, é apresentada uma tabela com os resultados compilados destes ensaios:

Identificação	$\Theta$ [um]	$\Delta R_m$ [um]	$\gamma$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]
Lâmina 1A	3	1	88	13	-4	88
Lâmina 1B	2	0	81	5	-7	81
Lâmina 1C	2	1	-73	14	3	-73
Lâmina 1D	3	0	74	6	-10	74
Lâmina 1E	3	0	90	10	-6	90
Lâmina 1F	5	2	-78	29	1	-78
Lâmina 1G	8	3	-65	43	-1	-65
Lâmina 1H	5	-1	-73	4	-22	-76
Lâmina 2A	5	-4	30	-10	-36	30
Lâmina 2B	4	1	85	15	-8	85
Lâmina 2C	3	1	86	13	-2	86
Lâmina 2D	2	0	89	10	-3	89
Lâmina 2E	4	3	76	30	8	76
Lâmina 2F	4	1	88	17	-1	88
Lâmina 2G	4	1	-89	14	-4	-89
Lâmina 2H	3	2	-66	22	4	-66
Lâmina 3A	3	0	80	7	-10	80
Lâmina 3B	2	-2	-57	-7	-19	-57
Lâmina 3C	2	-2	53	-10	-18	53
Lâmina 3D	3	-2	74	-5	-20	74
Lâmina 3E	1	-2	-69	-8	-14	-69
Lâmina 3F	5	1	-40	20	-8	-40
Lâmina 3G	4	0	11	9	-14	11
Lâmina 3H	6	1	-85	22	-8	-85
Lâmina 4A	3	0	-80	9	-9	-80
Lâmina 4B	2	0	-50	6	-4	-50
Lâmina 4C	2	0	87	7	-4	87
Lâmina 4D	2	0	-88	6	-2	-88
Lâmina 4E	1	0	-78	2	-2	-78
Lâmina 4F	3	1	78	12	-4	78
Lâmina 4G	3	1	-80	14	-2	-80
Lâmina 4H	3	0	88	11	-4	88
Lâmina 5A	2	0	84	8	-4	84
Lâmina 5B	3	0	-90	9	-8	-90
Lâmina 5C	2	0	88	8	-5	88
Lâmina 5D	2	0	-86	8	-2	-86
Lâmina 5E	2	0	-84	6	-7	-84
Lâmina 5F	2	0	-85	6	-3	-85
Lâmina 5G	3	-1	-74	0	-18	-74
Lâmina 5H	2	-1	84	-2	-12	84
Lâmina 6A	6	-1	-72	6	-23	-72
Lâmina 6B	4	0	86	9	-10	86
Lâmina 6C	5	4	47	36	10	47
Lâmina 6D	6	-2	-79	3	-26	-79
Lâmina 6E	6	0	-77	14	-16	-77
Lâmina 6F	8	3	-88	39	-4	-88
Lâmina 6G	4	-1	-88	3	-19	-88
Lâmina 6H	2	0	-80	3	-9	-80

Identificação	$\Theta$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta R_m$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\gamma$ [ $^\circ$ ]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [ $^\circ$ ]
Lâmina 7A	4	-1	66	4	-16	66
Lâmina 7B	3	1	78	13	-4	78
Lâmina 7C	1	0	-83	4	1	-83
Lâmina 7D	2	1	-89	10	-2	-89
Lâmina 7E	3	0	78	11	-7	78
Lâmina 7F	4	0	87	8	-14	87
Lâmina 7G	3	0	-90	9	-6	-90
Lâmina 7H	2	-2	-59	-10	-19	-59
Lâmina 8A	7	1	82	23	-16	82
Lâmina 8B	3	0	89	10	-6	89
Lâmina 8C	1	-1	-73	-3	-9	-73
Lâmina 8D	1	0	84	1	-4	84
Lâmina 8E	3	-1	-81	5	-13	-81
Lâmina 8F	4	0	-85	14	-7	-85
Lâmina 8G	2	2	87	20	9	87
Lâmina 8H	11	3	88	48	-9	88
Lâmina 9A	4	1	84	19	-1	84
Lâmina 9B	3	0	-71	4	-9	-71
Lâmina 9C	7	2	60	33	-2	60
Lâmina 9D	3	4	-10	34	16	-10
Lâmina 9E	3	0	-81	8	-6	-81
Lâmina 9F	3	-1	86	1	-14	86
Lâmina 9G	3	1	-83	14	-1	-83
Lâmina 9H	3	0	88	12	-5	88

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios para a caracterização de tensões residuais de membrana

Onde:

$\Theta$  [ $\mu\text{m}$ ] é a ovalização máxima em micrometros;

$\Delta R_m$  [ $\mu\text{m}$ ] é a variação do raio médio em micrometros;

$\gamma$  [ $^\circ$ ] é a direção de máxima ovalização em graus;

$\sigma_1$  [MPa],  $\sigma_2$  [MPa] são os valores das tensões residuais equivalentes em MPa, para um material com módulo de elasticidade E de 210000 MPa e coeficiente de Poisson de 0,27.

$\beta$  [ $^\circ$ ] é a direção das tensões principais

### 3.5.1 Gráficos dos resultados

A seguir são apresentados gráficos da ovalização, variação média do raio, tensão residual equivalente máxima ( $\sigma_1$ ) e tensão residual equivalente mínima ( $\sigma_2$ ) em função da região em que as amostras foram coletadas.

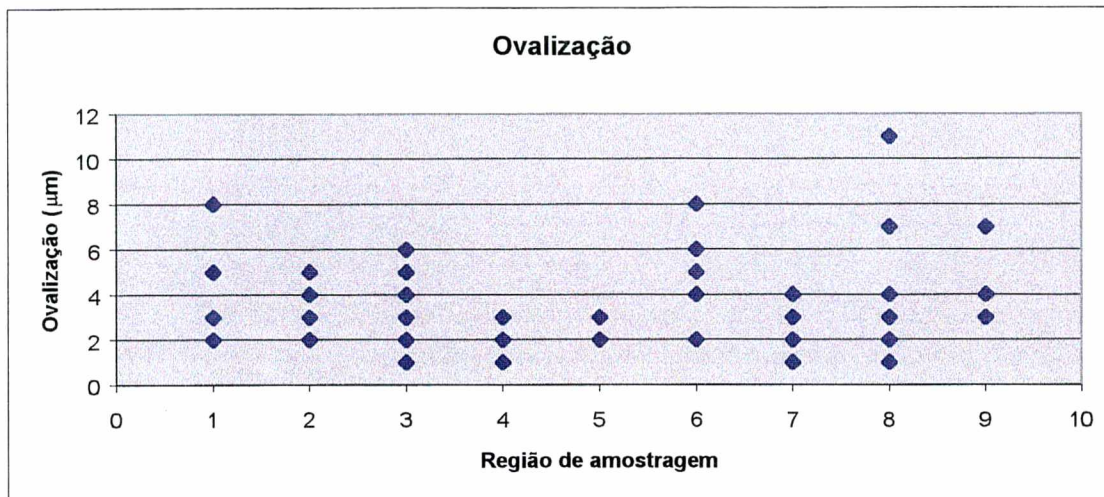


Figura 3.11 – Gráfico da ovalização x regiões de coleta das amostras

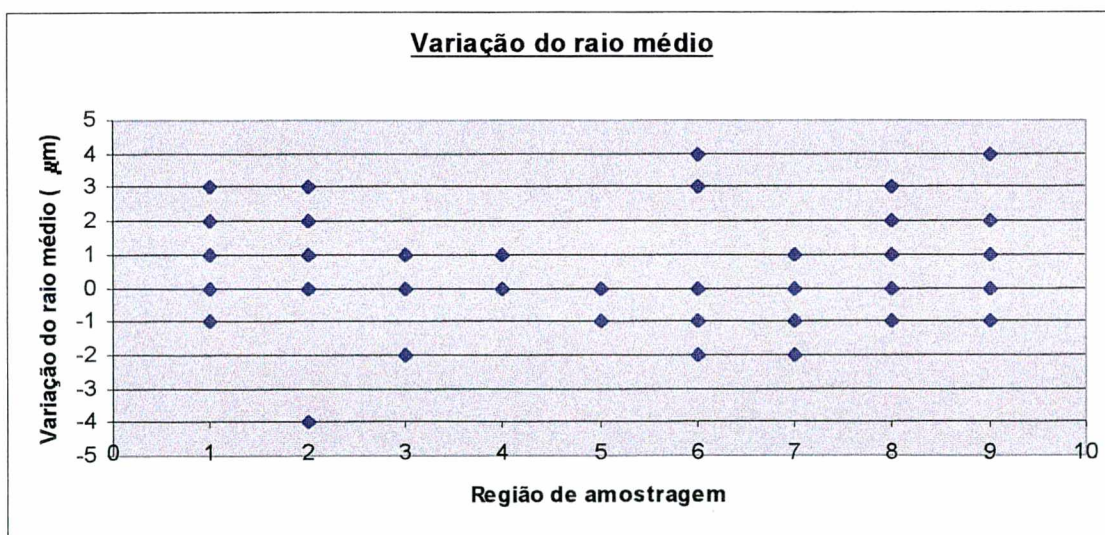


Figura 3.12 – Gráfico da variação do raio médio x regiões de coleta das amostras

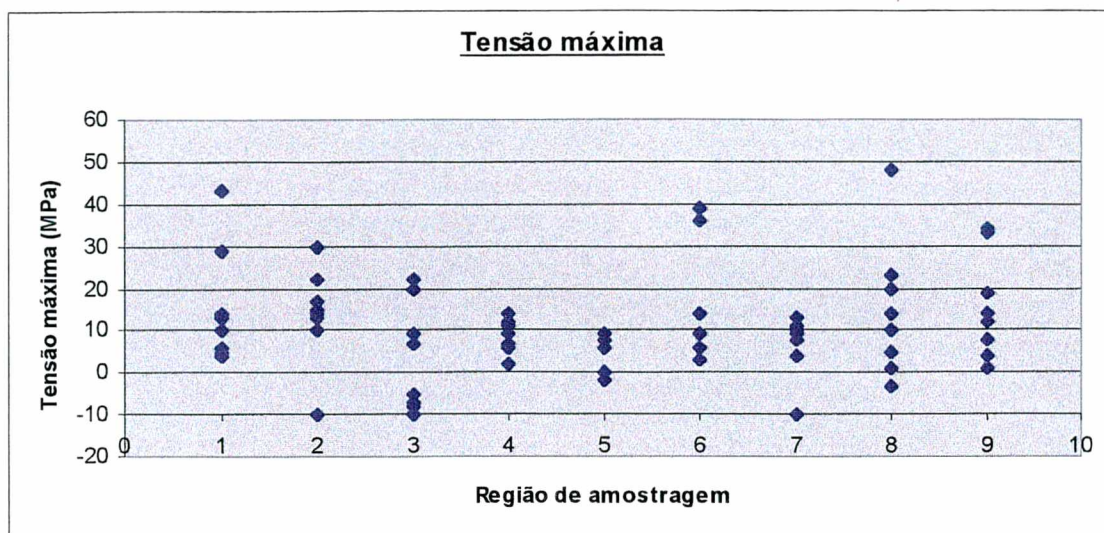


Figura 3.13 – Gráfico da tensão máxima x regiões de coleta das amostras

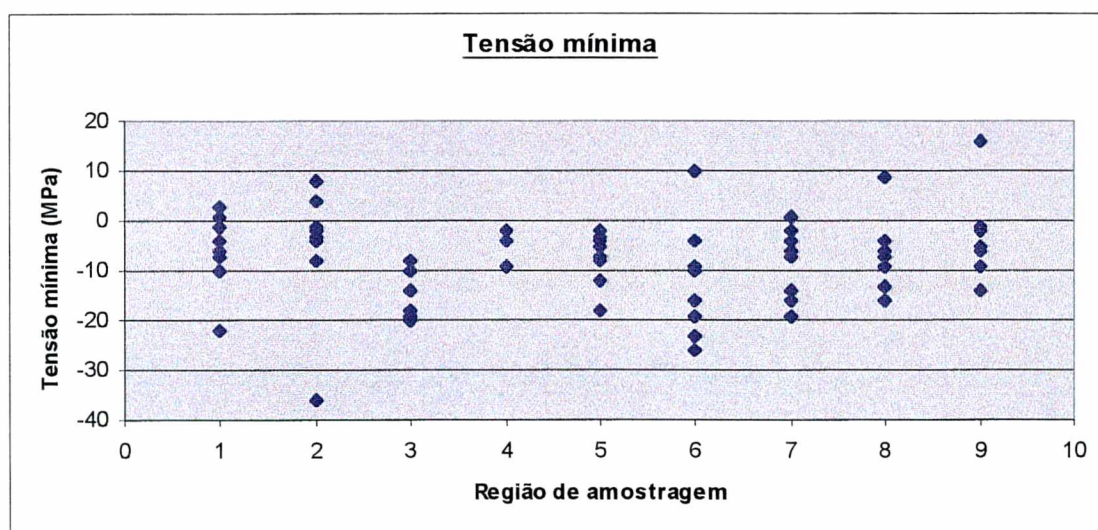


Figura 3.14 – Gráfico da tensão mínima x regiões de coleta das amostras

As variações dos resultados para cada região analisada são pouco expressivas, sendo causadas principalmente pelas incertezas da técnica.

Observa-se uma tendência das tensões residuais máximas equivalentes e da ovalização em serem menores no centro da bobina em relação às bordas, causado por um abaulamento convexo excessivo do cilindro laminador.



As peças produzidas a partir desta bobina não apresentaram problemas de ovalização excessiva, sendo que os valores obtidos nestes ensaios estão dentro da tolerância admitida para a utilização do material.

## CAPÍTULO 4

### **Caracterização de tensões residuais de flexão**

Um dos principais efeitos das tensões residuais de flexão sobre peças estampadas é o seu empenamento. Peças que, após a estampagem, deveriam permanecer planas, sofrem empenamento, em maior ou menor grau, em função do tipo e da intensidade do estado de tensões residuais de flexão presentes na chapa antes da estampagem. A forma empenada assumida pela peça estampada contém informações associadas às tensões residuais de flexão.

Os raios de curvatura assumidos e a forma geométrica resultante podem ser usados para obter parâmetros quantitativos associados aos níveis de tensões residuais de flexão presentes na chapa fina.

O mesmo disco central, removido do corpo de prova idealizado para quantificação das tensões residuais de membrana, é usado para quantificar as tensões residuais de flexão. Para tal, a geometria do disco empenado é medida e, em função dos raios de curvatura e das orientações obtidas, são quantificados parâmetros associados às tensões residuais de flexão. Por sua simetria, a forma circular do disco é extremamente conveniente para detectar as direções de máxima e mínima curvatura [19].

Três parâmetros geométricos são extraídos da forma deformada do disco: empenamento máximo, empenamento mínimo e direção onde ocorre a flecha máxima. Os empenamentos são determinados a partir de linhas diametrais, onde calcula-se a diferença entre o ponto mais elevado e o ponto mais baixo da linha que descreve o perfil da superfície do disco ao



longo de um diâmetro. A inclinação média do perfil é determinada pelo método dos mínimos quadrados de cada perfil diametral e removida antes que seja computada a flecha. O ângulo correspondente ao diâmetro onde a flecha é máxima é então obtido, bem como os valores máximo e mínimo do empenamento.

#### 4.1 Modelo matemático

Foi desenvolvido, avaliado e implementado, via software, um modelo matemático para quantificação de tensões residuais de flexão equivalentes no disco. Este modelo baseia-se na medição do raio de curvatura médio observado nos vários diâmetros analisados do disco. Quanto menor o raio de curvatura, e, portanto, mais curvado estiver o disco, maior a tensão residual de flexão presente. Através da teoria clássica de flexão em placas finas, é possível calcular a tensão mecânica equivalente na superfície da chapa que provocaria os mesmos raios de curvatura observados. Estas tensões são dadas por [18,19]:

$$\sigma_1 = \frac{E \cdot w}{1 - \nu^2} \left( \frac{1}{\rho_1} + \nu \cdot \frac{1}{\rho_2} \right) \quad \sigma_2 = \frac{E \cdot w}{1 - \nu^2} \left( \frac{1}{\rho_2} + \nu \cdot \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (4.1)$$

onde:

$\rho_1$  é o maior raio de curvatura encontrado [mm]

$\rho_2$  é o menor raio de curvatura encontrado [mm]

$E$  é o módulo de elasticidade do material [MPa]

$\nu$  é o coeficiente de Poisson

$w$  é a metade da espessura da chapa [mm]

Os raios de curvatura são calculados a partir da função  $z(x, y)$  que descreve a distância da superfície deformada do disco em relação a um plano de referência. Os raios de curvatura são obtidos a partir do inverso da segunda derivada de  $z(x, y)$  calculada ao longo da linha de cada diâmetro analisado (d):

$$\frac{1}{\rho_1} = -\frac{\partial^2 z}{\partial t_1^2} \quad \text{e} \quad \frac{1}{\rho_2} = -\frac{\partial^2 z}{\partial t_2^2} \quad (4.2)$$

- z      é a distância da chapa em relação ao plano de referência (função do empenamento) [mm];
- t      representa a variável sobre a linha diametral na qual z foi medido [mm]

Computacionalmente, este cálculo foi implementado a partir do ajuste de um polinômio de grau dois sobre o perfil medido. A segunda derivada do polinômio de segundo grau corresponde a duas vezes seu coeficiente de segundo grau.

Assim, além dos parâmetros  $\Delta z_{\text{máx}}$  (empenamento máximo),  $\Delta z_{\text{mín}}$  (empenamento mínimo) e os respectivos ângulos, o programa calcula também as tensões residuais de flexão equivalentes,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , e seus respectivos ângulos principais.

Deve ser deixado claro que tensões positivas correspondem a discos convexos, isto é, seu centro se encontra em altura mais elevada que as bordas. Se o disco for posicionado de forma invertida, isto é, com a face superior para baixo, os sinais das tensões residuais equivalentes serão invertidos.

## CAPÍTULO 5

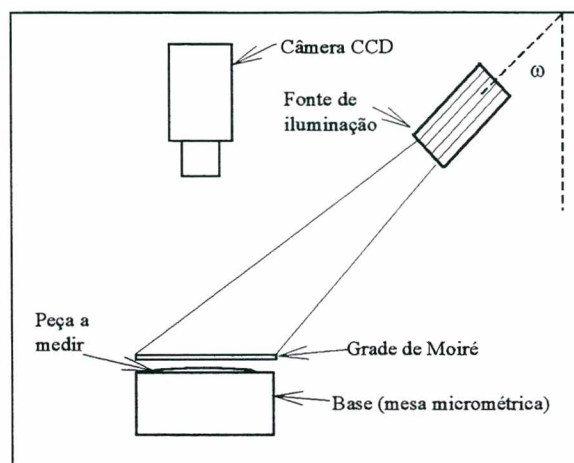
### **Medição do empenamento do disco por moiré de projeção**

Através do método óptico de medição denominado “moiré de projeção” ou “shadow moiré” é possível obter visualmente um conjunto de franjas sobre a superfície do disco associadas ao seu empenamento, isto é, ao erro de forma em relação a uma superfície plana de referência. A forma e quantidade das franjas formadas dão inclusive informações qualitativas sobre a intensidade e a direção em que ocorreu o empenamento. O processamento da imagem das franjas permite a plena quantificação do campo de empenamento do disco.

Padrões de franja por moiré de projeção (shadow moiré) podem ser observados quando uma grade padrão (master grating) é posicionada próxima à superfície a ser examinada e iluminada por uma fonte de luz mediante um ângulo oblíquo  $\omega$ , como visto na figura 5.1 [20].

Neste arranjo, uma fonte de luz colimada incide sobre a peça e a grade. É importante ressaltar que o aparato deve ser montado deixando um pequeno espaço entre a grade e a superfície medida. Desse modo, uma sombra bem definida da grade padrão é projetada sobre a superfície medida. A figura projetada, constituída de linhas claras e escuras, passa a ser uma nova grade, cuja geometria é levemente distorcida em função da forma da superfície medida. Um observador (ou câmera de TV), posicionado frontalmente ao conjunto grade/superfície medida, percebe o batimento causado pela superposição da grade

de “shadow moiré”. Esse padrão de franjas resultante está associado à topografia da superfície medida. No caso particular do disco central extraído do corpo de prova, as franjas obtidas estão diretamente associadas à forma espacial da superfície do corpo de prova, que, por sua vez, está ligada ao seu empenamento.



*Figura 5.1- Arranjo esquemático na geração de franjas pelo método de moiré de projeção (shadow moiré)*

Nessa técnica, a sensibilidade está diretamente relacionada ao passo da grade padrão,  $p=1/f$ , onde  $f$  é a frequência da grade (expressa em linhas por milímetro) e é também função do ângulo de incidência da iluminação. A distância entre a superfície da grade de referência à superfície medida está relacionada com as franjas observadas de acordo com a equação:

$$z = \frac{N \cdot p}{\tan \omega} \quad (5.1)$$

onde “ $N$ ” é a ordem de franja observada e “ $p$ ” é o passo da grade padrão. No caso, o dispositivo empregado apresenta sensibilidade da ordem de 0,085 mm por franja, isto é, a cada franja corresponde a uma variação da distância grade/peça de 0,085 mm. Este valor é obtido utilizando-se a equação 5.1, para um ângulo médio de observação de  $45^\circ$  e passo da grade de 12 linhas/mm. Estas franjas são visíveis ao olho nu de um observador. O número e a forma das franjas observadas contém informações qualitativas e quantitativas sobre o empenamento do corpo de prova. Essas franjas são equivalentes a curvas de nível de mapas



topográficos. Pontos que estiverem sobre a mesma linha, ou ordem de franja (N), estarão situados a uma mesma distância da grade de referência (z).

Qualitativamente, a interpretação apenas visual destas franjas exige um certo treinamento. Em situações onde o número de franjas visíveis é pequeno, torna-se ainda mais difícil obter informações qualitativas acerca da forma da superfície.

Para quantificar o empenamento da superfície do corpo de prova e viabilizar a determinação das tensões residuais equivalentes, foi utilizado um sistema de processamento de imagens. Este sistema consiste de uma câmera CCD, um microcomputador com placa de processamento de imagens e uma mesa acionada por um parafuso micrométrico para realizar o deslocamento de fase, da forma explicada a seguir:

A intensidade de cada ponto na imagem das franjas captada pela câmera CCD pode ser modelada pela seguinte equação [21]:

$$I = I_F + I_M \cdot \cos(\phi) \quad (5.2)$$

onde:

$I_F$  = intensidade de fundo (corresponde à intensidade média)

$I_M$  = modulação das franjas (está associada ao contraste das franjas)

$\phi$  é o ângulo de fase

O ângulo de fase  $\phi$  é um parâmetro associado ao mapa de franjas. Franjas claras possuem valores do ângulo de fase congruos de  $0^\circ$ . Franjas escuras, ângulos congruos de  $180^\circ$ . Ao longo de uma linha que une duas franjas consecutivas o ângulo de fase varia de forma contínua dentro de um ciclo de  $360^\circ$ .

O método do deslocamento de fase é uma forma muito eficiente de processar e analisar quantitativamente mapas de franjas. Consiste em aplicar pequenos incrementos de deslocamentos visando aproximar a peça e a grade padrão de modo a provocar um deslocamento lateral das franjas. Matematicamente isto equivale a adicionar um valor constante à fase de todos os pontos da imagem.

Quando se desloca a peça com a mesa micrométrica, de maneira que uma franja vizinha se posicione exatamente onde estava a franja anterior, diz-se que ocorreu um deslocamento de fase de  $360^\circ$ , o que equivale a uma ordem de franja.

Para a determinação da diferença de fase ( $\phi$ ) de cada ponto, utilizou-se o método dos quatro passos [22]. Este método consiste em adquirir 4 imagens correspondentes a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ . Estas imagens são adquiridas pela câmera CCD, deslocando a peça através da mesa micrométrica em frações de  $\frac{1}{4}$  de um deslocamento de fase de  $360^\circ$ . As intensidades são dadas pela equação 5.2, resultando para o caso:

$$I = I_F + I_M \cdot \cos(\phi) \quad (5.3a)$$

$$I = I_F + I_M \cdot \cos(\phi + 90^\circ) \quad (5.3b)$$

$$I = I_F + I_M \cdot \cos(\phi + 180^\circ) \quad (5.3c)$$

$$I = I_F + I_M \cdot \cos(\phi + 270^\circ) \quad (5.3d)$$

Efetuada-se a combinação matemática destas intensidades, obtém-se:

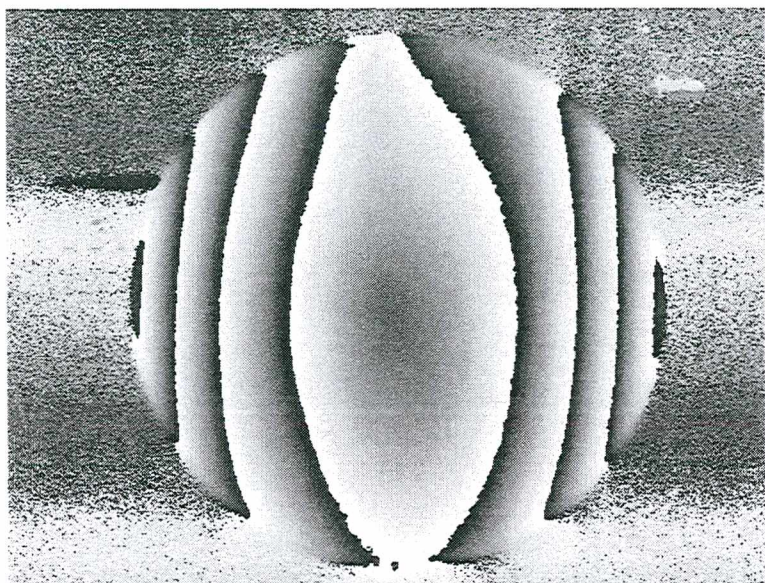
$$\text{tg}\phi = \frac{(I_{270} - I_{90})}{(I_{180} - I_0)}$$

e portanto

$$\phi = \arctg \frac{(I_{270} - I_{90})}{(I_{180} - I_0)} \quad (5.4)$$

Através da placa de processamento de imagens, obtém-se o mapa de fase resultante. Na figura 5.2 é apresentada uma imagem de um mapa de fases. Os valores de  $\phi$  são representados no vídeo, ponto a ponto, em escala de nível de cinza. Pontos que apresentam fase  $0^\circ$  possuem nível de cinza 0 (preto) e variações de fase de  $360^\circ$  correspondem a variações de 256 níveis de cinza.

A ordem de franja para qualquer ponto da imagem é precisamente obtida com grande facilidade e, em função desta e dos ângulos de observação e iluminação, calcula-se a distância em relação à superfície da grade de referência de cada ponto da imagem.



*Figura 5.2 - Mapa de fase obtido com deslocamento de fase com 4 passos*

Na figura 5.2 observa-se que, em determinados locais, há um salto do branco (cinza 255) para o preto (cinza 0). Isso ocorre devida à função  $\arctg$  fornecer apenas o ângulo  $\phi$  dentro da primeira volta ( $0^\circ \leq \text{ângulo de fase} < 360^\circ$ ). Assim, ao incrementar a fase  $359^\circ$  em  $1^\circ$ , passa-se para a fase  $0^\circ$ , com correspondente descontinuidade no nível de cinza. Tais descontinuidades são denominadas de saltos de fase [23]. Estes saltos de fase são removidos via software segundo algoritmo apropriado. Desta forma, obtém-se um mapa topográfico da superfície analisada, com o qual, usando o modelo apresentado no item 4.1, determina-se as tensões residuais equivalentes.



## **CAPÍTULO 6**

### **Sistema computadorizado para caracterização de tensões residuais de flexão**

Foi elaborado e executado um projeto para construção de um dispositivo computadorizado de medição de tensões residuais de flexão utilizando a técnica moiré de projeção. Este dispositivo tem como finalidade ser empregado próximo à uma linha de produção, para que sejam feitas análises dos corpos de prova no próprio local da fabricação.

#### **6.1 Requisitos de projeto**

Os objetivos, cenário e funções [24,25] do sistema computadorizado desenvolvido estão apresentados no anexo A

#### **6.2 Implementação**

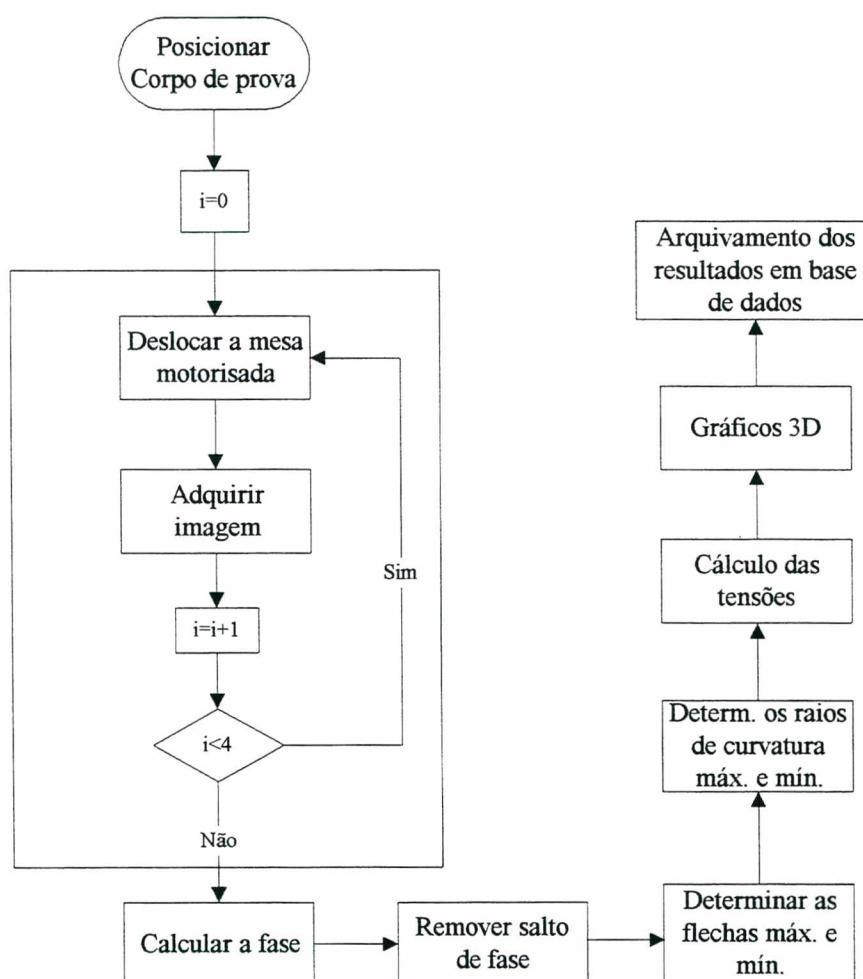
Uma das grandes virtudes do dispositivo desenvolvido é a automatização de todas as etapas da medição. Através de um software que controla todo o processo, são feitos a aquisição das imagens, o deslocamento de fase, o processamento das imagens e os cálculos dos parâmetros para a caracterização das tensões residuais de flexão.

A aquisição das imagens é feita através da câmera CCD. A placa de processamento faz a digitalização das imagens, que são armazenadas no microcomputador.



O deslocamento de fase é feito através da mesa motorizada. O software controla os deslocamentos de cada passo para a obtenção das imagens que vão compor o mapa de fases.

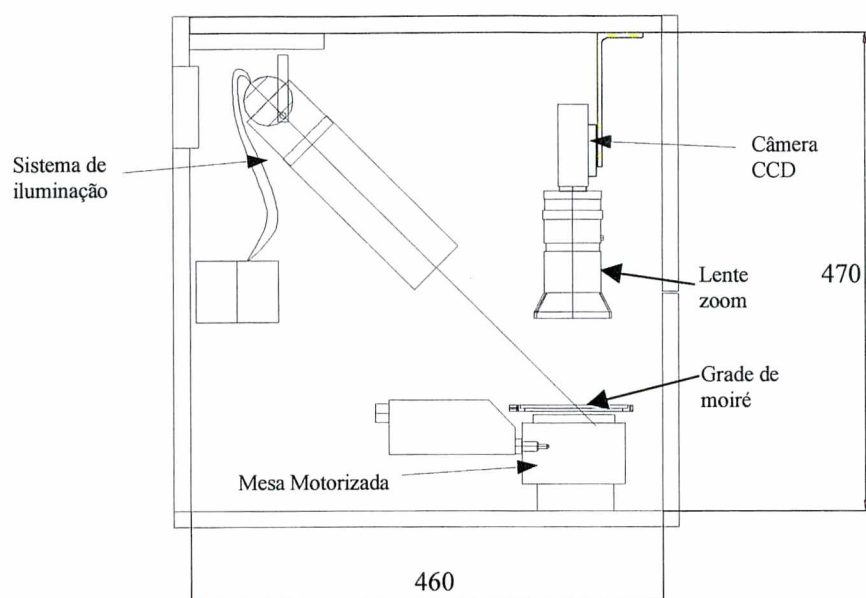
O processamento das imagens é feito através do microcomputador. O mapa de fase é obtido de acordo com a equação 5.4, e o software executa também a remoção do salto de fases. O fluxograma geral do software é apresentado na figura 6.1.



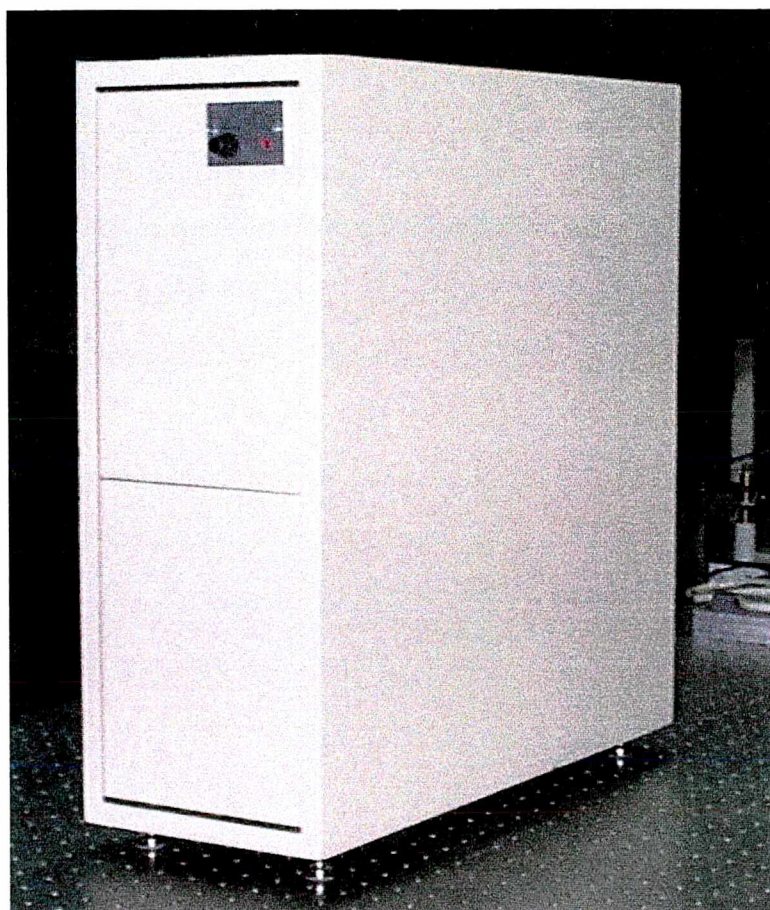
*Figura 6.1 – Fluxograma geral do software do sistema computadorizado para medição de tensões residuais de flexão*

No anexo B, é apresentado os componentes e suas características técnicas.

A estrutura externa do sistema foi feito em madeira. Os componentes foram distribuídos de acordo com a figura 6.2. Fotos do sistema são mostradas nas figuras 6.3 a 6.5.

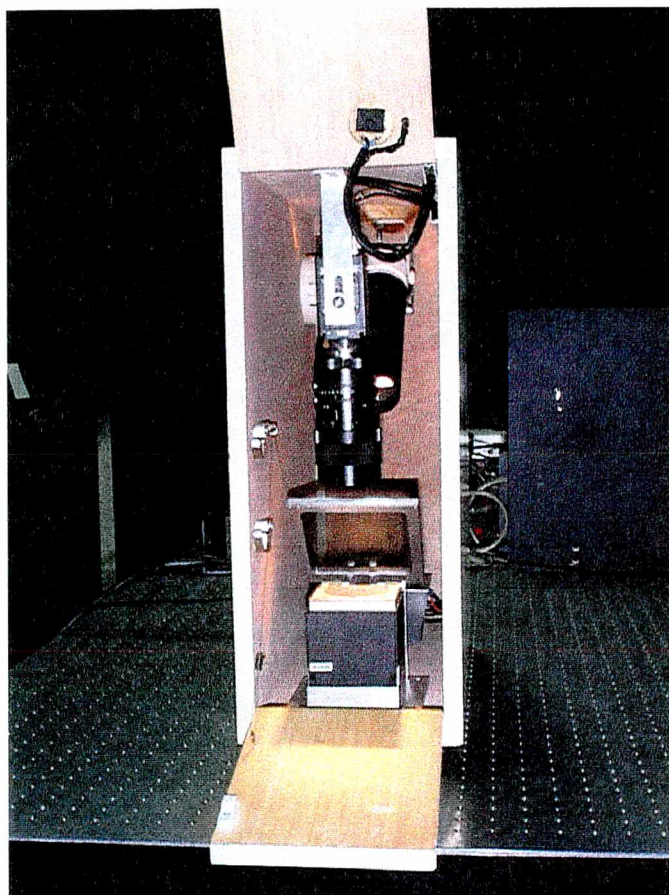


*Figura 6.2 – Esquema da distribuição interna dos componentes do sistema de moiré*

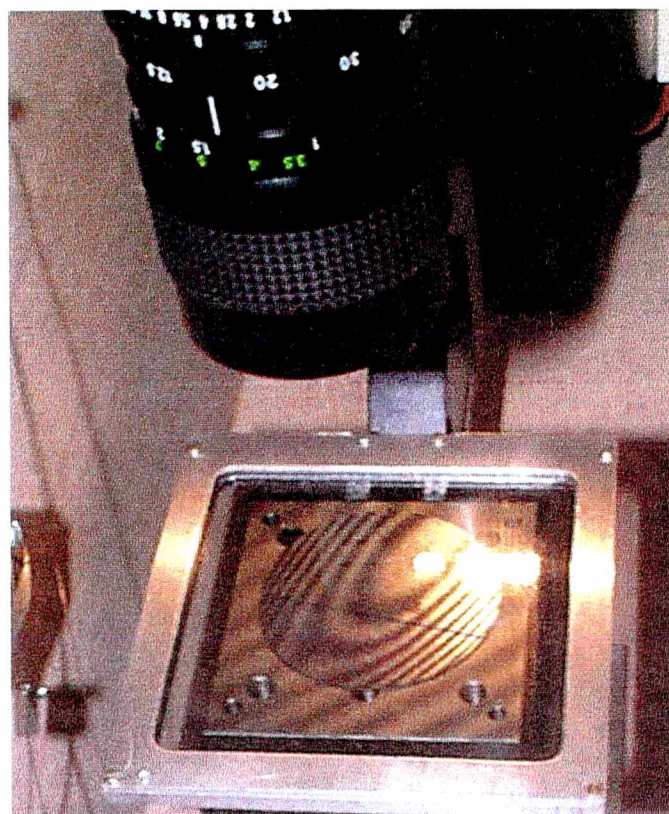


*Figura 6.3 – Foto externa do dispositivo de moiré*





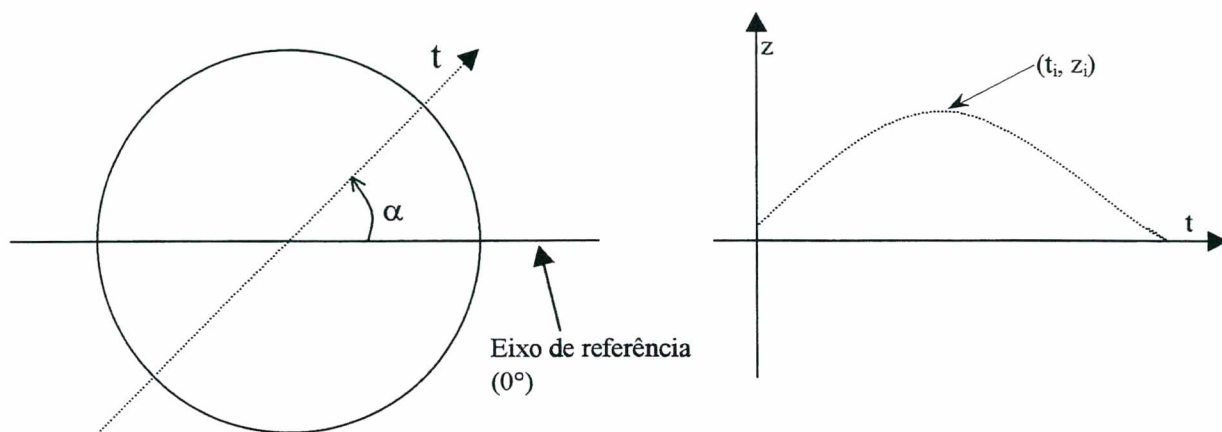
*Figura 6.4 – Foto do sistema de moiré com as portas frontais abertas*



*Figura 6.5 – Foto em detalhe da grade de moiré e corpo de prova*

### 6.3 Cálculo do empenamento máximo e mínimo

Os cálculos dos empenamentos máximo e mínimo citado no capítulo 4 são feitos a partir dos pontos do mapa topográfico obtido após a remoção dos saltos de fase. O software faz uma varredura a partir de linhas diametrais de toda a superfície do corpo de prova, ajustando os pontos em um polinômio de segundo grau (figura 6.6).



$$0^\circ \leq \alpha < 180^\circ$$

*Figura 6.6 – Representação da varredura feita pelo software para o cálculo do empenamento*

O polinômio é ajustado da seguinte maneira:

A partir das coordenadas dos pontos obtidos na reta  $(t_i, z_i)$ , é feito um cálculo matricial para a obtenção dos coeficientes  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$  do polinômio:

$$z = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2$$

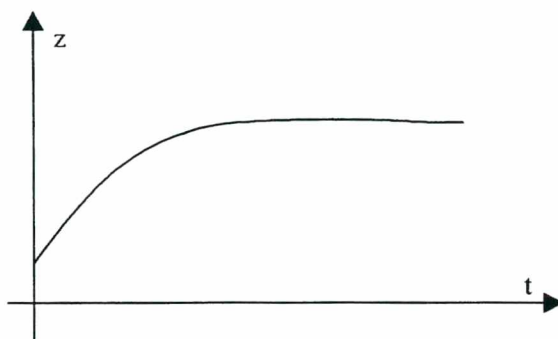
$$\begin{Bmatrix} n \\ \sum_{i=1}^n t_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t_i^3 \\ \sum_{i=1}^n t_i^4 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n t_i \cdot z_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot z_i \end{Bmatrix}$$

Onde:

$n$  é o número de pontos medidos ao longo do diâmetro

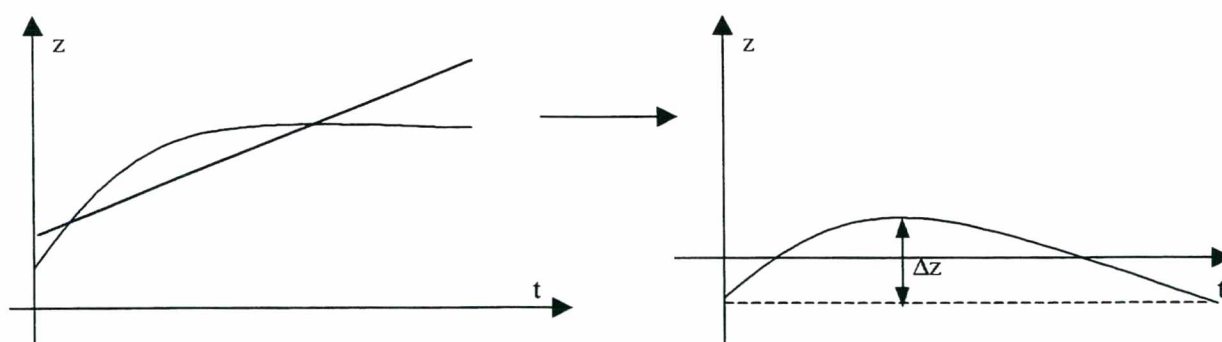
$t$  é a posição do ponto medido longo da linha diametral

Como nem sempre o apoio da peça está perfeitamente paralelo à grade de moiré, o perfil da peça obtido pode não ter os extremos com o valor  $z = 0$ , de acordo com a figura 6.7.



*Figura 6.7 – Perfil obtido quando o apoio da peça não está paralela à grade de moiré*

A inclinação média do perfil é determinada pelo método dos mínimos quadrados de cada perfil diametral e removida antes que seja computada o empenamento (figura 6.8). Para tal, ajusta-se uma reta pelos pontos medidos e sua equação é subtraída ponto a ponto dos dados originais:



*Figura 6.8 – Remoção da inclinação média do perfil*

O  $\Delta z$  é calculado através da subtração da coordenada  $z$  máxima e mínima. O cálculo dos empenamentos máximo e mínimo ( $\Delta z_{\text{máx}}$  e  $\Delta z_{\text{mín}}$ ), e seus respectivos ângulos, é feito após o programa ter completado a varredura conforme a figura 6.6.



O cálculo das tensões é feito a partir de uma varredura semelhante ao que é feita para o cálculo do empenamento máximo, só que é verificado o coeficiente quadrático da equação polinomial (metade da segunda derivada de uma equação de segundo grau), conforme equações 4.1 e 4.2. Substituindo os valores nestas equações, é verificado o maior valor em módulo de  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ . Após a determinação do maior valor em módulo, é analisado o eixo defasado em 90 graus e calculado o valor da outra tensão.

A tela do software desenvolvido para a caracterização das tensões residuais de flexão é apresentada na figura 6.9. Nas figuras 6.10 e 6.11 são apresentadas figuras geradas pelo software ilustrando o perfil tridimensional e o empenamento medido.

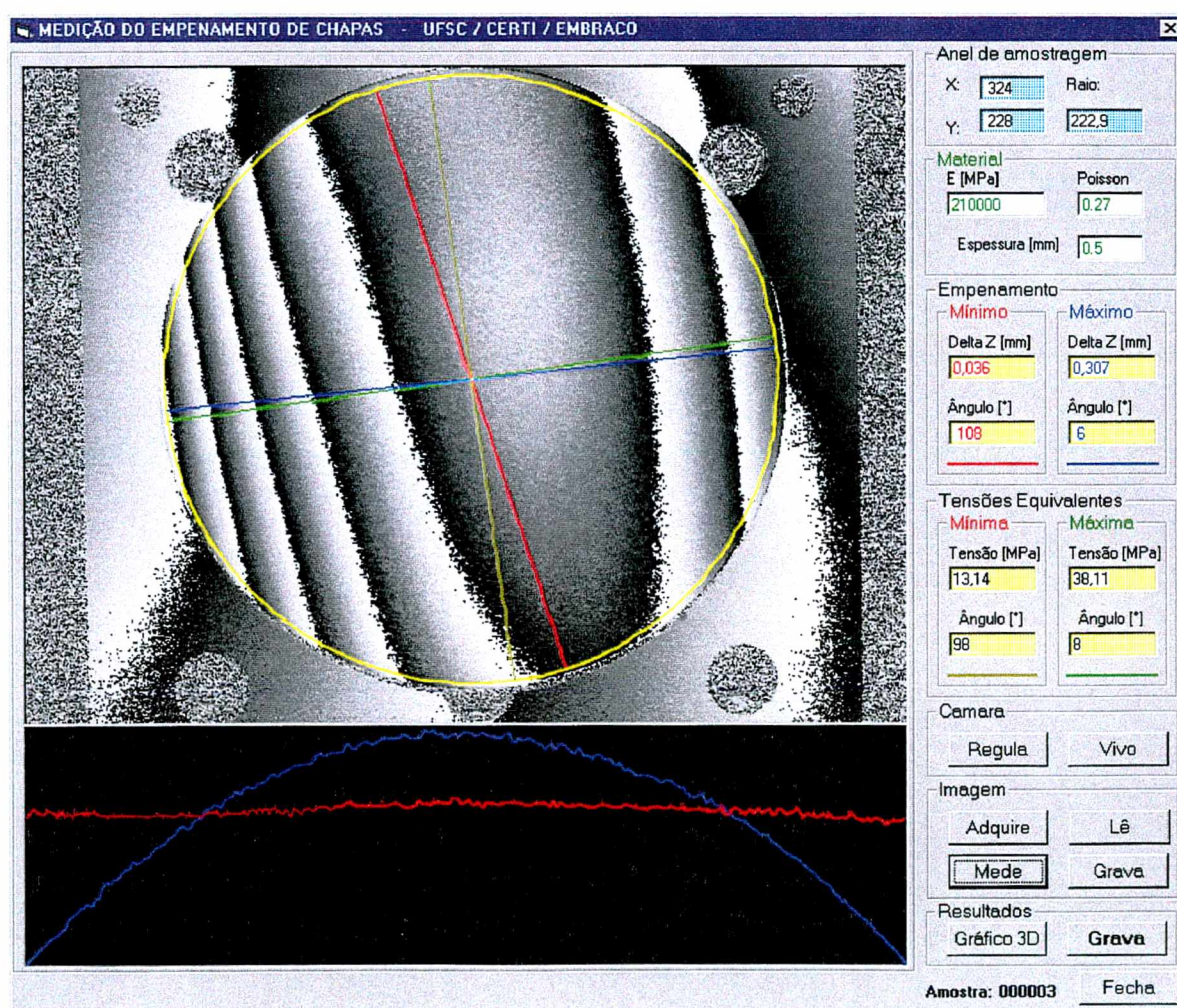
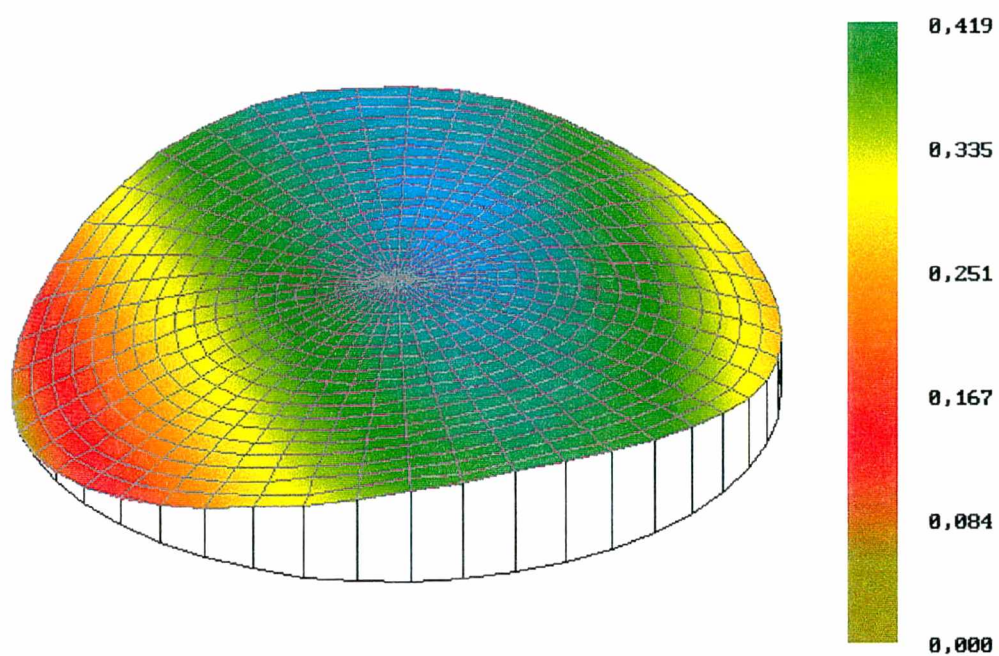
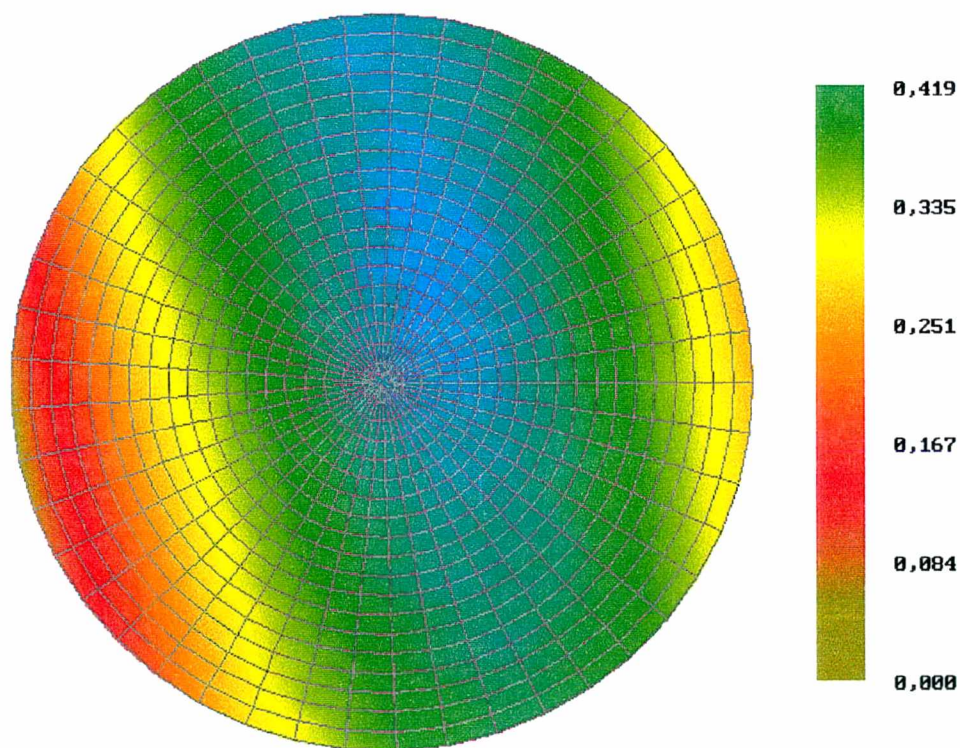


Figura 6.9 – Tela do software para caracterização de tensões residuais de flexão





*Figura 6.10 – Perfil Tridimensional do corpo de prova medido –  
dimensões em mm*



*Figura 6.11 – Vista de topo do corpo de prova medido - dimensões em mm*

## 6.4 Compensação dos erros sistemáticos do sistema

Para avaliar os erros sistemáticos do sistema foi medida uma peça com erro de planicidade inferior a 0,004 mm. Observou-se que ocorreu uma certa distorção das franjas obtidas, conforme mostra a figura 6.12. Franjas retas, paralelas e equiespaçadas indicariam apenas que a superfície não está perfeitamente paralela à grade de moiré. Como foi mostrado no item 6.3, essas inclinações são compensadas. Mas as franjas apresentam pequenas curvaturas, que podem ter surgido em função dos seguintes fatores:

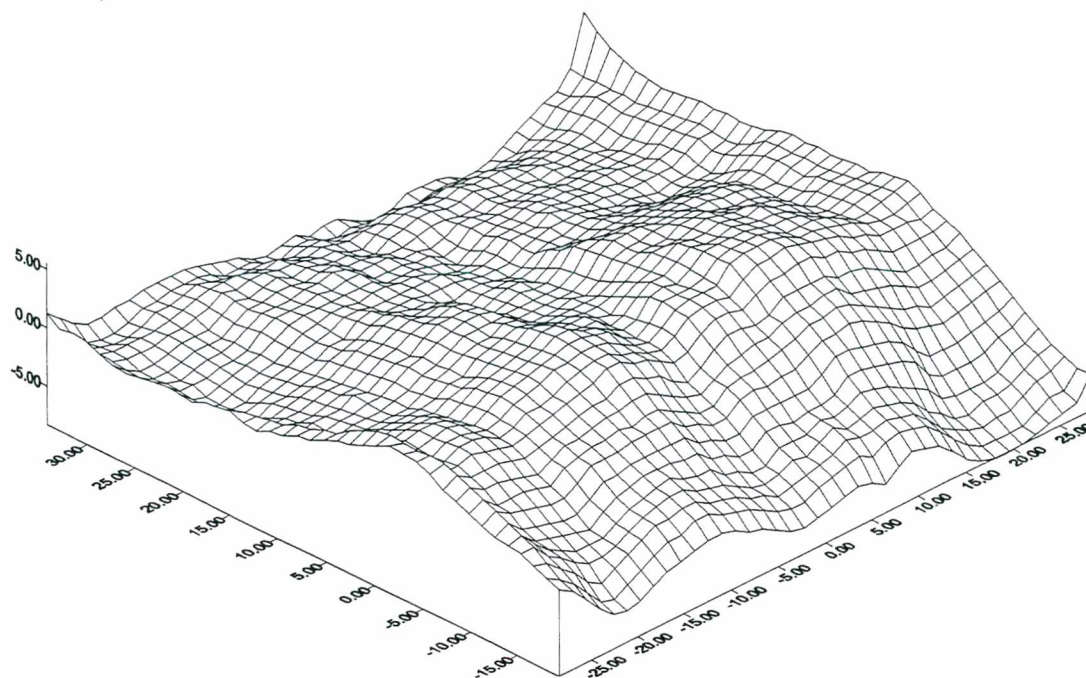
- a) erro de planicidade da grade
- b) o sistema de iluminação não fornece luz perfeitamente colimada (o ângulo de iluminação não é constante em toda a área de medição)
- c) o ângulo de observação não é constante em toda a imagem em função da relativamente pequena distância entre as lentes da câmera e a peça medida.



*Figura 6.12 - Mapa de fase obtido com peça com erro de planicidade inferior a 0.004 mm*

Ao ser processada, a imagem da figura 6.12 fornece os resultados mostrados na figura 6.13, que representam o erro de forma aparente da superfície plana. Trata-se, na verdade, de uma estimativa dos erros sistemáticos induzidos no sistema pelos fatores citados acima. Nota-se que valores extremamente baixos foram obtidos.





*Figura 6.13 – Estimativa dos erros sistemáticos do sistema na região de medição (erros em  $\mu\text{m}$ , dimensões em mm)*

Caso os erros sistemáticos representados na figura 6.13 fossem muito pronunciados, o mapa de fase da figura 6.12 poderia ser subtraído de cada mapa de fase das peças medidas como forma de compensar estas distorções, provocadas pelas não idealidades do sistema. Como o nível de erro sistemático encontrado é muito pequeno, da ordem do erro aleatório estimado para o sistema, decidiu-se por não efetuar esta operação corretiva.

## 6.5 Teste de repetitividade do sistema

Foram realizados alguns ensaios visando a determinação da repetitividade do sistema. Um mesmo corpo de prova foi medido repetidamente cinco vezes sendo este removido do sistema e novamente posicionado antes de uma nova medição. A seguir é apresentada uma tabela com os resultados obtidos:

lamina 1

	Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	$\Delta Z$	Ângulo (°)	$\Delta Z$	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)
1	0.306	168	0.051	66	38.77	180	18.20	90
2	0.308	168	0.050	72	38.73	180	18.20	90
3	0.305	174	0.049	76	38.78	180	17.76	90
4	0.307	172	0.045	72	38.90	180	17.90	90
5	0.309	170	0.047	72	38.67	180	17.62	90
média	0.307	170	0.048	72	38.77	180	17.94	90
desv pd.	0.0016	2.6	0.0024	3.6	0.085	0.0	0.261	0.0

lamina 2

	Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	$\Delta Z$	Ângulo (°)	$\Delta Z$	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)
1	0.293	8	0.065	116	6.56	86	-8.56	176
2	0.288	2	0.066	114	6.65	84	-7.80	174
3	0.286	2	0.068	112	7.15	88	-7.67	178
4	0.287	8	0.064	120	5.10	76	-7.82	166
5	0.287	6	0.065	110	5.02	76	-7.92	166
média	0.288	5	0.066	114	6.10	82	-7.95	172
desv pd.	0.0028	3.0	0.0015	3.8	0.972	5.7	0.350	5.7

lamina 3

	Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	$\Delta Z$	Ângulo (°)	$\Delta Z$	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)
1	0.312	178	0.055	88	34.72	178	16.41	88
2	0.307	174	0.058	90	34.65	178	15.89	88
3	0.306	178	0.055	88	34.47	180	15.68	90
4	0.306	180	0.058	94	34.50	180	15.78	90
5	0.305	180	0.056	88	34.34	180	15.60	90
média	0.307	178	0.056	90	34.54	179	15.87	89
desv pd.	0.0028	2.4	0.0015	2.6	0.151	1.1	0.320	1.1

Tabela 6.1 - Teste de repetitividade com reposicionamento do corpo de prova

## 6.6 Estimativa do valor da repetitividade na medição dos parâmetros de empenamento

A estimativa da incerteza de medição na determinação dos parâmetros do empenamento foi baseada apenas na parcela aleatória, uma vez que a parcela sistemática foi muito pequena, conforme descrito no item 6.4. Optou-se pela análise das variações de cada grupo de medidas em relação às respectivas médias dos 3 corpos de prova, mostrados no item anterior.



As diferenças dos valores em relação às respectivas médias são apresentadas a seguir:

		Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
		Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	Nº da medição	$\Delta Z - \Delta Z_m$	$\hat{\Delta} \text{Ang} - \hat{\Delta} \text{Ang}_m (^{\circ})$	$\Delta Z - \Delta Z_m$	$\hat{\Delta} \text{Ang} - \hat{\Delta} \text{Ang}_m (^{\circ})$	Tensão - Tensão <sub>m</sub>	$\hat{\Delta} \text{Ang} - \hat{\Delta} \text{Ang}_m (^{\circ})$	Tensão - Tensão <sub>m</sub>	$\hat{\Delta} \text{Ang} - \hat{\Delta} \text{Ang}_m (^{\circ})$
Lâmina 1	1	-0.0010	-2.4000	0.0026	-5.6000	0.0000	0.0000	0.2640	0.0000
	2	0.0010	-2.4000	0.0016	0.4000	-0.0400	0.0000	0.2640	0.0000
	3	-0.0020	3.6000	0.0006	4.4000	0.0100	0.0000	-0.1760	0.0000
	4	0.0000	1.6000	-0.0034	0.4000	0.1300	0.0000	-0.0360	0.0000
	5	0.0020	-0.4000	-0.0014	0.4000	-0.1000	0.0000	-0.3160	0.0000
Lâmina 2	1	0.0048	2.8000	-0.0006	1.6000	0.4640	4.0000	-0.6060	4.0000
	2	-0.0002	-3.2000	0.0004	-0.4000	0.5540	2.0000	0.1540	2.0000
	3	-0.0022	-3.2000	0.0024	-2.4000	1.0540	6.0000	0.2840	6.0000
	4	-0.0012	2.8000	-0.0016	5.6000	-0.9960	-6.0000	0.1340	-6.0000
	5	-0.0012	0.8000	-0.0006	-4.4000	-1.0760	-6.0000	0.0340	-6.0000
Lâmina 3	1	0.0048	0.0000	-0.0014	-1.6000	0.1840	-1.2000	0.5380	-1.2000
	2	-0.0002	-4.0000	0.0016	0.4000	0.1140	-1.2000	0.0180	-1.2000
	3	-0.0012	0.0000	-0.0014	-1.6000	-0.0660	0.8000	-0.1920	0.8000
	4	-0.0012	2.0000	0.0016	4.4000	-0.0360	0.8000	-0.0920	0.8000
	5	-0.0022	2.0000	-0.0004	-1.6000	-0.1960	0.8000	-0.2720	0.8000

Tabela 6.2 - Diferenças dos valores dos parâmetros do empenamento em relação às respectivas médias

Foram considerados o empenamento máximo e mínimo como sendo parte de uma mesma amostra. O desvio padrão para o empenamento foi de 0,0020 mm, e para o ângulo, 2,8°.

Com 24 graus de liberdade (4 graus de liberdade para cada parâmetro de cada corpo de prova), o coeficiente t-student para 95% de confiabilidade é de 2,064 [15]. A repetitividade de cada parâmetro é dada multiplicando o valor do desvio padrão pelo coeficiente t-student.

Portanto, as repetitividades para o empenamento seu respectivo ângulo são:

$$\text{Re}(\Delta z) = \pm 0,0041 \text{ mm}$$

$$\text{Re}(\alpha) = \pm 5,8^{\circ}$$

Para os valores das tensões e seus respectivos ângulos, foi considerado os valores máximos e mínimos como fazendo parte da mesma amostra. Realizando-se os cálculos de maneira idêntica ao da determinação dos valores para o empenamento, obtém-se os seguintes valores de repetitividade:

$$\text{Re}(\sigma) = \pm 0,9 \text{MPa} \qquad \text{Re}(\alpha) = \pm 6,2^\circ$$

Observa-se que o valor da repetitividade dos ângulos é elevada, em torno de  $7^\circ$ . Isso ocorre devido ao reposicionamento do corpo de prova, que, por ser de formato circular, não há como apoiá-lo sobre a mesa de medição de forma que o ângulo fique bem determinado. Portanto, os valores de repetitividade calculados não refletem o desempenho do sistema, que é muito superior.

### **6.7 Ensaaios realizados para determinação de tensão residual de flexão**

Foram medidos os empenamentos dos discos centrais, obtidos na estampagem do corpo de prova, cuja caracterização de tensões residuais de flexão foram determinadas no capítulo 3. A seguir, é apresentada a tabela com os valores obtidos. Os mapas de fase obtidos encontram-se no anexo C.

Lâmina	Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
	Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo	
	$\Delta Z$	Ângulo(°)	$\Delta Z$	Ângulo(°)	Tensão	Ângulo(°)	Tensão	Ângulo(°)
1A	0.012	104	0.056	10	2.60	80	6.46	170
1B	0.066	104	0.131	22	3.76	66	14.80	156
1C	0.009	168	0.074	86	1.22	18	6.33	108
1D	0.009	74	0.063	6	-1.56	68	5.71	158
1E	0.014	108	0.110	8	3.11	76	11.51	166
1F	0.010	52	0.081	160	-9.17	18	-0.98	108
1G	0.012	88	0.120	4	4.70	97	16.56	7
1H	0.010	130	0.041	178	-3.40	178	2.42	88
2A	0.008	62	0.132	170	-15.22	8	-1.86	98
2B	0.014	68	0.069	6	0.39	84	5.83	174
2C	0.018	116	0.040	22	2.25	54	4.25	144
2D	0.006	52	0.057	158	-5.71	178	0.37	88
2E	0.013	80	0.117	14	-14.23	168	-2.64	78
2F	0.011	64	0.116	178	-13.40	180	-2.18	90
2G	0.008	142	0.049	6	-3.73	168	2.09	78
2H	0.008	126	0.067	6	-6.38	174	1.03	84
3A	0.013	126	0.124	178	-7.00	90	12.60	0
3B	0.007	102	0.032	158	-2.81	178	0.09	88
3C	0.070	80	0.264	174	-33.91	10	-17.32	100
3D	0.034	6	0.139	130	-12.35	78	-6.99	168
3E	0.070	50	0.103	142	-14.96	34	-12.12	124
3F	0.065	94	0.335	178	-43.89	180	-19.13	90
3G	0.019	88	0.124	176	5.24	90	15.49	180
3H	0.090	104	0.147	18	-19.93	162	-15.60	72
4A	0.015	52	0.082	178	-0.77	88	8.21	178
4B	0.016	122	0.075	178	-1.65	90	7.65	180
4C	0.015	20	0.029	88	-2.31	90	0.84	180
4D	0.023	88	0.052	178	-6.43	176	-3.97	86
4E	0.018	116	0.128	174	-1.01	90	12.67	180
4F	0.012	126	0.052	4	-2.46	88	3.59	178
4G	0.016	64	0.125	178	-0.44	90	13.88	180
4H	0.017	68	0.139	180	1.93	90	16.31	180
5A	0.059	38	0.130	122	-17.84	58	-10.92	148
5B	0.078	84	0.175	154	-24.26	6	-15.24	96
5C	0.014	162	0.116	98	-12.87	76	0.37	166
5D	0.019	168	0.128	104	-14.78	74	-0.66	164
5E	0.071	56	0.151	138	-20.56	34	-13.22	124
5F	0.014	50	0.126	102	-12.69	80	6.05	170
5G	0.018	32	0.121	82	-11.16	98	7.64	8
5H	0.015	128	0.108	80	-10.64	102	3.12	12



Lâmina	Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
	Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo	
	$\Delta Z$	Ângulo(°)	$\Delta Z$	Ângulo(°)	Tensão	Ângulo(°)	Tensão	Ângulo(°)
6A	0.055	86	0.196	170	-26.70	6	-13.83	96
6B	0.052	90	0.249	168	-33.68	4	-14.05	94
6C	0.100	82	0.351	172	-48.10	8	-24.40	98
6D	0.021	38	0.101	124	-13.20	60	-5.66	150
6E	0.099	82	0.465	180	26.42	90	59.74	180
6F	0.066	74	0.159	168	-21.62	16	-13.50	106
6G	0.077	90	0.407	180	-52.57	180	-22.08	90
6H	0.102	110	0.227	10	-29.56	160	-19.27	70
7A	0.040	82	0.407	178	18.03	98	52.86	8
7B	0.007	74	0.076	140	-7.80	52	0.86	142
7C	0.050	106	0.147	6	10.55	84	19.18	174
7D	0.010	42	0.111	106	-12.73	78	0.73	168
7E	0.008	62	0.128	22	-11.91	72	11.15	162
7F	0.028	90	0.302	180	12.76	88	37.43	178
7G	0.007	114	0.086	168	-5.34	114	7.32	24
7H	0.009	78	0.345	176	10.83	88	42.49	178
8A	0.016	76	0.140	168	2.18	90	14.13	180
8B	0.019	66	0.175	180	-1.67	88	16.46	178
8C	0.019	60	0.135	174	-15.21	180	-2.44	90
8D	0.045	92	0.087	168	7.30	88	10.40	178
8E	0.012	74	0.167	160	-14.91	12	-3.73	102
8F	0.020	48	0.145	168	-14.43	12	2.83	102
8G	0.025	56	0.229	176	0.94	96	27.09	6
8H	0.019	118	0.151	178	-0.27	88	17.11	178
9A	0.093	68	0.235	154	19.04	110	32.03	20
9B	0.064	86	0.353	178	18.73	90	41.67	0
9C	0.050	142	0.136	36	-16.61	132	-8.12	42
9D	0.055	78	0.254	166	14.92	98	33.32	8
9E	0.018	130	0.091	70	-10.84	116	-2.99	26
9F	0.069	120	0.159	32	-20.84	166	-14.12	76
9G	0.0	118	0.099	172	-4.23	88	5.81	178
9H	0.021	110	0.062	30	-8.05	152	-3.98	62

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios para a caracterização de tensões residuais de flexão

### 6.6.1 Gráficos dos resultados

Com a finalidade de ilustrar uma aplicação do sistema, apresentam-se nas figuras a seguir gráficos de resultados dos parâmetros obtidos para cerca de 70 corpos de prova extraídos de um mesmo rolo de chapa, conforme já definido no Capítulo 3. Não se tem a intenção de

avaliar o comportamento do material em si, mas apenas mostrar alguns resultados obtidos nas condições típicas onde se pretende usar o sistema.

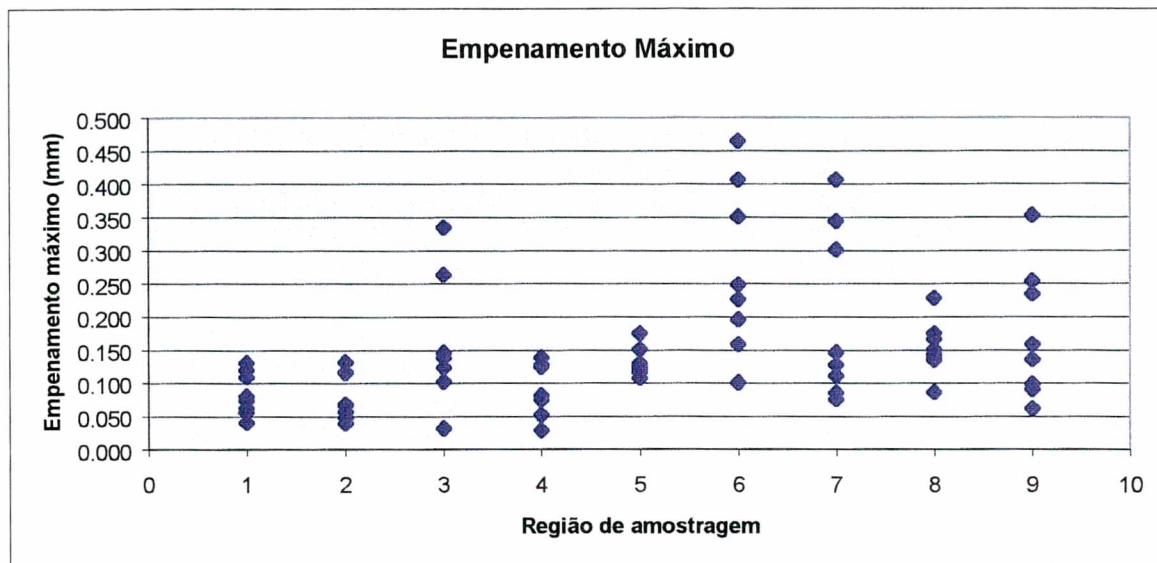


Figura 6.14 – Gráfico do empenamento máximo x regiões de coleta das amostras

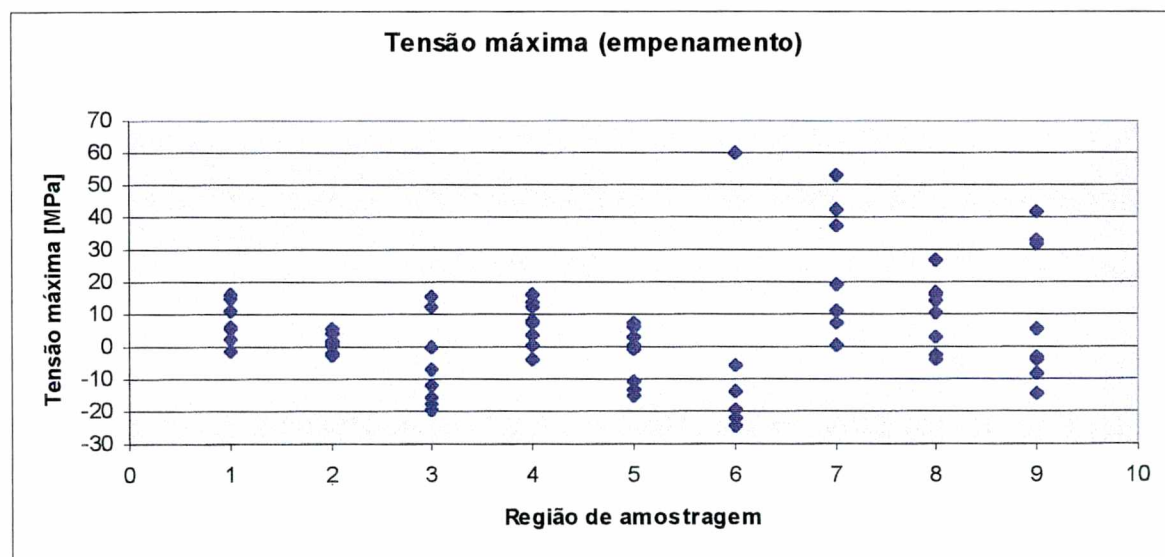


Figura 6.15 – Gráfico da tensão máxima (empenamento) x regiões de coleta das amostras

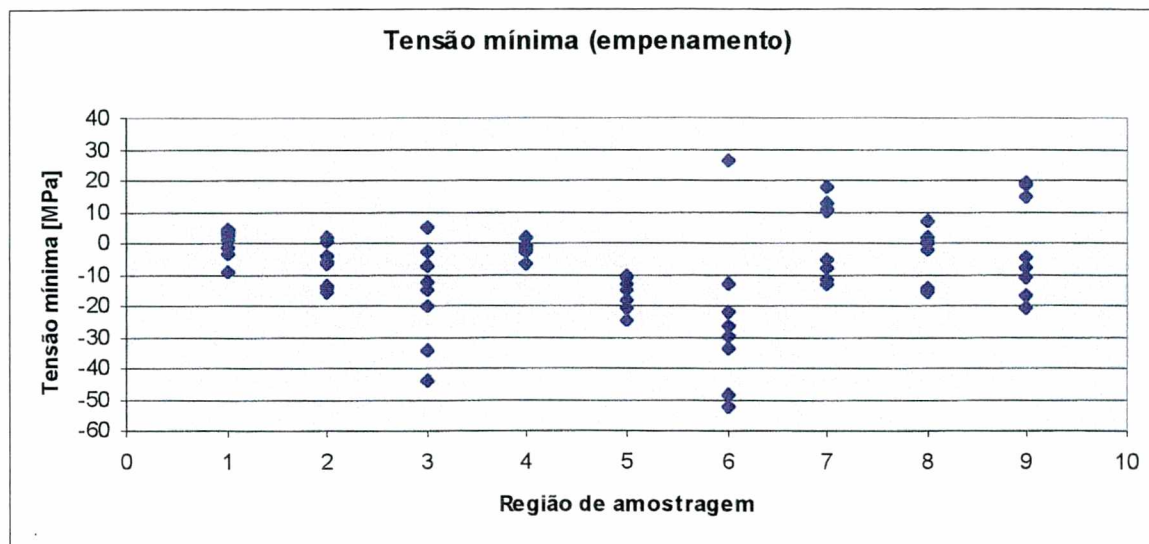
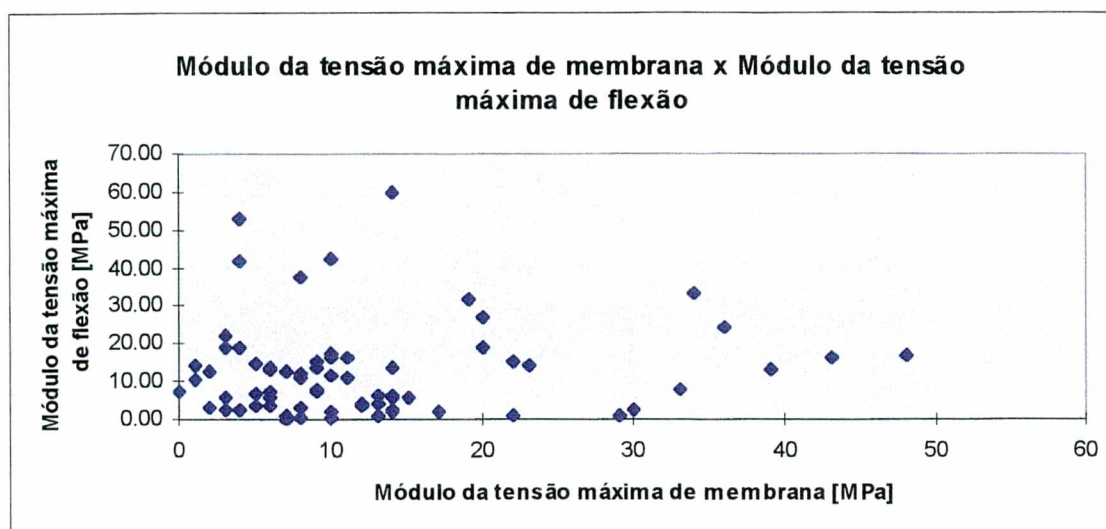


Figura 6.16 – Gráfico da tensão mínima (empenamento) x regiões de coleta das amostras

Nota-se variações consideráveis dos vários parâmetros não somente em função da posição onde a amostra foi retirada, mas também dentro de cada grupo de amostras. Quando comparadas com os valores de repetitividade estimados para o sistema, nota-se que as variações obtidas são muito mais dispersas. Isto mostra que a grandeza medida é uma grandeza variável, isto é, não apresenta valor único, mas fortemente variável ao longo da posição na chapa.

A figura 6.17 mostra a combinação de dois tipos de resultados para o mesmo corpo de prova: os módulos das tensões de membrana e de flexão máximos de cada corpo de prova são representados em um mesmo gráfico. Cada ponto traçado corresponde a um corpo de prova diferente. Não se nota correlação nítida entre tensões de membrana e de flexão, o que é uma constatação de que estes efeitos são separáveis, podendo ser individualmente quantificados por diferentes parâmetros.





*Figura 6.17 – Gráfico do módulo da tensão máxima de membrana x módulo da tensão máxima de flexão*

# CAPÍTULO 7

## Conclusões

Através deste trabalho foi desenvolvido e avaliado um meio para caracterizar parâmetros que possam ser correlacionados a problemas ligados ao empenamento e ovalização de peças estampadas a partir de chapas finas. Além do desenvolvimento de técnicas que permitem a quantificação de parâmetros associados aos níveis de tensões residuais de flexão e de membrana inicialmente presentes em chapas finas, o trabalho envolveu a construção e avaliação de um dispositivo automatizado de medição para a caracterização de tensões residuais de flexão.

Os testes e as análises de repetitividade realizadas mostraram que o sistema é confiável para as aplicações para os quais foi desenhado. É possível caracterizar os parâmetros associados aos efeitos das tensões residuais dentro das seguintes faixas de repetitividade:

Empenamento [mm]				Tensões equivalentes [MPa]			
Mínimo		Máximo		Mínimo		Máximo	
$\Delta Z$	Ângulo (°)	$\Delta Z$	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo (°)
$\pm 0,004$	$\pm 5,8$	$\pm 0,004$	$\pm 5,8$	$\pm 0,9$	$\pm 6,2$	$\pm 0,9$	$\pm 6,2$

Tabela 7.1 – Valores de repetitividade na determinação dos parâmetros para caracterização de tensões residuais de flexão

Para a determinação dos parâmetros das tensões residuais de membrana, cujas distâncias foram medidas na máquina de medir por coordenadas, obteve-se os seguintes valores de repetitividade:

$\Theta$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta R_m$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\gamma$ [ $^\circ$ ]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [ $^\circ$ ]
$\pm 2,1$	$\pm 2,0$	$\pm 5,7$	$\pm 13$	$\pm 13$	$\pm 5,7$

Tabela 7.2 – Valores de repetitividade na determinação dos parâmetros para caracterização de tensões residuais de membrana

Ensaaios experimentais foram realizados a partir de corpos de prova retirados de um material tipicamente usado no processo, visando avaliar aspectos operacionais e ilustrar a aplicabilidade do sistema. Os dados obtidos evidenciaram diferenças de comportamento distintas em diferentes regiões da chapa, deixando clara a capacidade do sistema em detectar as condições em que distorções excessivas da forma geométrica estarão presentes.

Os valores de repetitividade encontrados para os parâmetros ligados ao empenamento são muito menores que as dispersões dos resultados para os 72 corpos de prova ensaiados. Trata-se, portanto, de uma grandeza a medir variável, quantificada através de um processo de medição cuja dispersão é muito menor que as variações do mesurando. Isto mostra que o sistema está bem dimensionado para medir estes parâmetros.

Já os valores de repetitividade encontrados para a determinação dos parâmetros ligados à ovalização se aproximam dos valores da dispersão observada para os corpos de prova medidos. Isto deve-se ao fato do material ensaiado ter características muito favoráveis quanto à ovalização, isto é, peças produzidas com este material não apresentam problemas de ovalização. Trata-se de um material considerado “bom”, levando os parâmetros da ovalização próximos ao seu limite inferior. Situações de interesse prático recaem em materiais onde o problema da ovalização é mais pronunciado, situação onde os valores típicos esperados para os parâmetros de interesse serão muito superiores à repetitividade do sistema. Assim, também no que tange à quantificação da ovalização, o sistema está bem dimensionado.

A ausência de correlação entre os parâmetros associados à ovalização e ao empenamento constata que ambos efeitos podem ser analisados separadamente.

Sugestões para continuidade do trabalho:

a) Melhoria no sistema de medição da ovalização

Apesar da máquina de medir por coordenadas ter sido mais do que suficiente para a determinação da ovalização do corpo de prova, comprovou-se ser um método demorado para a realização deste tipo de medição. Uma alternativa que deve ser avaliada é a medição das distâncias entre centros dos corpos de prova utilizando uma máquina de medição por imagens. A construção de dispositivos de medição mecânicos e dedicados é outra alternativa que também pode levar a bons resultados.

b) Correlacionar os parâmetros calculados pelo sistema com os efeitos sobre a peça estampada;

Esta é, na verdade, a aplicação típica para o sistema. Deve-se correlacionar os valores dos parâmetros geométricos e das tensões residuais equivalentes com o nível de deformação causado após a estampagem do produto final. Assim, será possível analisar a matéria prima antes de sua utilização na estampagem para a fabricação do produto.

c) Adaptar a técnica desenvolvida para avaliar tensões residuais em outros materiais

Com algumas adaptações esta técnica pode ser empregada para caracterizar tendências de materiais como plásticos, laminados e polímeros em geral a apresentar problemas de ovalização e empenamento.

d) Definição de um procedimento normalizado

Em função do uso e aperfeiçoamento das técnicas aqui desenvolvidas acredita-se que seja possível, e do interesse da indústria, a definição de um procedimento normalizado para caracterização de tendências de chapas a apresentar problemas de empenamento e ovalização.

O término deste trabalho não põe um ponto final no assunto, mas apenas coincide com o início de um grande trabalho que visa correlacionar os parâmetros aqui desenvolvidos com os problemas encontrados na produção de componentes estampados. Numa segunda etapa, estes parâmetros poderão ser usados para, a partir de uma amostra de matéria-prima, prever quantitativamente a extensão dos efeitos de empenamento e ovalização na peça produzida.

# CAPÍTULO 8

## Referências Bibliográficas

- [1] Kobayashi, A.S., “*Handbook on experimental mechanics*” Society for Experimental Mechanics, Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] Rodacoski, M.R. “*Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica*” Tese de Doutorado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 1997
- [3] Jian, L. “*Handbook of Measurement of Residual Stress*” Society for Experimental Mechanics. Inc., The Fairmont Press, Inc., 1996
- [4] Boettger, J. “*Desenvolvimento de um Sistema Portátil para Medição de Tensões Residuais em Campo Utilizando a Holografia Eletrônica e o Método do Furo*” Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 1998
- [5] Niku-Lari, A. “*Advances in Surface Treatments – Volume 4 – Residual Stresses*” Pergamon Press, 1987
- [6] Ertas, A., Jones, J. “*The Engineerring Design Process*” John Wiley & Sons, Inc., 1993
- [7] Van Vlack, L. H., “*Princípio de Ciência dos Materiais*” Edgard Blücher, 1970
- [8] Dieter, G. E. “*Metalurgia mecânica*” Guanabara Dois, segunda edição, 1981
- [9] Albertazzi, A.G.J., Cavaco, M.A.M., Kanda, C. “*Caracterização de Tensões Residuais em Chapas Finas*” Anais do V SIBRAT/COTEQ 97 - Rio de Janeiro/RJ, 09/1997 - pp 183-186

- [10] Albertazzi, A.G.J., et al. “*Desenvolvimento e Avaliação de Procedimento para Caracterização de Tensões Residuais em Chapas Finas*” Anais do XVII CONAEND - Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos – ABENDE/ABIMAQ – São Paulo/SP – 08/1998 – pp 10-14
- [11] Albertazzi, A.G.J., et al. “*Residual Stresses Measurement Using a Radial Interferometer - A Preliminary Analysis*” VIII International Congress on Experimental Mechanics and Experimental /Numerical Mechanics in Eletronic Packaging - Nashville/Tennessee, 08/1996 - pp 27-28
- [12] Albertazzi, A.G.J., Kanda, C., Boettger, J. “*Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por Meio da Holografia Eletrônica*” III Simpósio de Análise Experimental de Tensões - ABCM - Rio de Janeiro/RJ, 12/95, pp 19-26
- [13] Albertazzi, A.G.J., “*Determinação de Tensões Residuais Localizadas Através de Moiré Assistida por TV*” XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – São Paulo/SP, 12/91, pp 45-48
- [14] Rendler, N.J., Vigness, I., “*Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses*” Experimental Mechanics, 12/66, pp 577-586
- [15] Albertazzi, A.G.J., “*Metrologia - Parte I*” – Apostila – UFSC – 1997
- [16] “*Guia para Expressão da Incerteza de Medição*” – Programa RH Metrologia - Primeira Edição – 1997
- [17] “*Measurement Systems Analysis*” – Reference Manual – A.I.A.G. - 1990
- [18] Dally, J.W., Riley, W.F., “*Experimental Stress Analysis*” McGraw-Hill, third edition, 1991
- [19] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger, S., “*Theory of Plates and Shells*” McGraw-Hill, second edition, 1970

- [20] Post, D., Han, B., Ifju, P. “*High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials*” Springer-Verlag, 1994
- [21] Zwemer, D., Hassell P., *Electronic Packaging Services, Ltd. Co.*; Mazeika, W., et al. *Viasystems Technologies “Shadow Moiré Based Printed Wiring Board Flatness Inspection”*
- [22] Cloud, G. L. “*Optical Methods of Engineering Analysis*” Cambridge University Press, 1995
- [23] Gasvik, K.J. “*Optical Metrology*” John Wiley & Sons, Inc., 1995
- [24] Back, N. “*Metodologia de Projeto de Produtos Industriais*” Guanabara Dois – 1983
- [25] Madureira, O.M. Apostila do curso “*Planejamento e Desenvolvimento de Produtos*” Associação Brasileira de Engenharia Automotiva - 1998
- [26] Catálogo Newport “*Opto-mechanical Components*”, 1997/98 Catalog
- [27] Catálogo Newport “*Motion Control*”, 1997/98 Catalog
- [28] Manual da câmera de vídeo Hitachi – Model KP-M1
- [29] Edmund Scientific “*Optics and Optical Instruments Catalog*”, 1998
- [30] RS do Brasil – 1998 Catalogue
- [31] Relatório parcial do projeto “*Caracterização de tensões residuais em chapas finas*” Projeto Certi-Embraco – PO006 – Abril – 1997
- [32] Relatório parcial do projeto “*Caracterização de tensões residuais em chapas finas*” Projeto Certi-Embraco – PO006 – Outubro – 1997
- [33] Relatório parcial do projeto “*Caracterização de tensões residuais em chapas finas*” Projeto Certi-Embraco – PO006 – Março – 1998



- [34] Relatório parcial do projeto “*Caracterização de tensões residuais em chapas finas*”  
Projeto Certi-Embraco – PO006 – Junho – 1998

## **ANEXO A**

### **Requisitos do projeto do sistema de medição para caracterização de tensões residuais de flexão**

#### **A.1 Objetivos do produto**

- medir o empenamento de um corpo de prova circular, com 60 mm de diâmetro;
- medir as direções e os valores dos empenamentos máximo e mínimo;
- calcular tensões residuais de flexão equivalentes.

#### **A.2 Cenário**

- o dispositivo será utilizado em uma sala próxima ao local de produção, em ambiente climatizado e livre de vibrações e poeira;
- aplicações típicas a que o sistema se destina requerem medições de empenamento a partir de 0.01 mm, o que exige o sistema de medição a capacidade de medir a forma da superfície do corpo de prova com incerteza não superior a 0.005 mm;
- A faixa de medição para o empenamento máximo é de 0.01 mm a 1 mm.
- Deseja-se elevado grau de automação dos ensaios

#### **A.3 Funções**

⇒ Obter dados

- Posicionar a peça no sistema de medição
  - Acessar com facilidade o local da medição
  - Apoiar a peça
  - Manter as peças centradas em relação à área de medição
- Iluminar a região a medir
  - Gerar luz colimada
  - Direcionar a luz com inclinação apropriada
  - Promover iluminação uniforme e com intensidade adequada

- Adquirir imagens
  - Captar imagens
  - Deslocar fase

⇒ Processar dados

- Processar imagens
  - Definir região a analisar (dimensão e posicionamento)
  - Remover salto de fase
  - Discretizar dados da imagem
- Calcular resultados
  - Calcular empenamento máximo e mínimo
  - Calcular tensões residuais equivalentes

⇒ Apresentar resultados

- Visualizar na tela
  - Valores dos parâmetros, tensões residuais equivalentes, dados do material
- Imprimir resultados (relatório completo)
- Exportar resultados (planilha Excel®)

## **ANEXO B**

### **Lista dos principais componentes sistema computadorizado para medição de tensões residuais de flexão**

#### **Câmera de vídeo Hitachi P&B - Modelo KP-M1**

##### **Características principais:**

Câmera de vídeo CCD preto&branco

Dimensão do CCD: padrão 2/3 de polegadas

Tensão de alimentação: 12V DC.

CCD com 410.000 píxeis e 768(H) x 493(V) píxeis efetivos

CCIR: Número de píxies: 490.000 756(H) x 581(V) píxeis efetivos

Resolução horizontal: 570 (560 em CCIR) “TV lines”

Resolução vertical: 485 (475 em CCIR) “TV lines”

Velocidade do shutter selecionável de 1/100 (1/120 em CCIR) a 1/10000

#### **Lente Zoom Edmund Scientific**

##### **Características principais:**

Comprimento focal variável de 12,5 a 75 mm

Abertura: 1:1,2 – 16C

Distância do objeto: 1m -  $\infty$

Campo de visão para distância mínima do objeto: 120 a 1000 mm

Campo de visão para distância máxima do objeto: 44° - 7,8°

Dimensões do filtro: 55x0,75

Dimensão máxima do CCD: 2/3 de polegada

Diâmetro x comprimento: 55,75 x 97

Massa: 305 g

**Placa de processamento de imagem Matrox Pulsar****Características principais:**

Sinal analógico/digital

10 bit A/D

Interface digital de 16 bit

Barramento PCI

Tempo de transferência real para o sistema ou para a memória da placa VGA

Resolução superior a 1600 X 1200

4 Mb de memória WRAM

**Grade de moiré Edmund Scientific****Características principais:**

Dimensões externas: 100 x 100 mm

11,8 linhas por milímetro (300 linhas por polegada)

**Mesa de translado vertical Newport****Características principais:**

Modelo: M-MVN80

Curso total de 12,5 mm

Capacidade de carga máxima: 40 Kg

**MotorDC Newport****Características principais:**

Modelo: 850F

Curso total: 50 mm

Faixa de velocidade: 40 a 500  $\mu\text{m/s}$

Incerteza do posicionamento:  $<0.06\%$  do deslocamento efetuado

Repetitividade bidirecional:  $\pm 1 \mu\text{m}$

“Backlash”: 20  $\mu\text{m}$  (máximo)

Incremento mínimo do movimento: 1  $\mu\text{m}$

Capacidade de carga: 8 kg  
Capacidade de carga lateral: 2.3 kg  
Resolução do encoder: 0.05  $\mu$ m  
Cabo: 3.5 m com conector de 25-pinos sub-D  
Faixa da temperatura de operação: 11 a 28° C

### **Placa controladora do motor DC Newport**

#### **Características principais:**

Modelo: MM2000  
Tipos de trajetórias: Movimentos não sincronizados  
Movimentos sincronizados multi eixos  
Perfil da velocidade: Trapezoidal  
Compatibilidade do dispositivo: Todos os motores de passo Newport e motores DC com encoder (exceção: modelo PM500)  
Controle do motor DC: Resolução de 12 bit DAC  
Frequência máxima de entrada no encoder: 1MHz  
Controle digital PID  
Controle do motor de passo: Frequência máxima de pulsos: 1,5 MHz  
Completo, meio e frações de passos (passo/10)  
Operação em malha aberta ou fechada  
Interface com o computador: Placa com barramento ISA, IBM PC ou compatível  
Interface RS-232C  
Alimentação: +5V DC @ 2A  
Dimensões : 105 x 333 mm (placa interna do PC)  
40 x 282 x 220 mm para a interface externa  
Massa: < 1kg

### **Sistema de Iluminação**

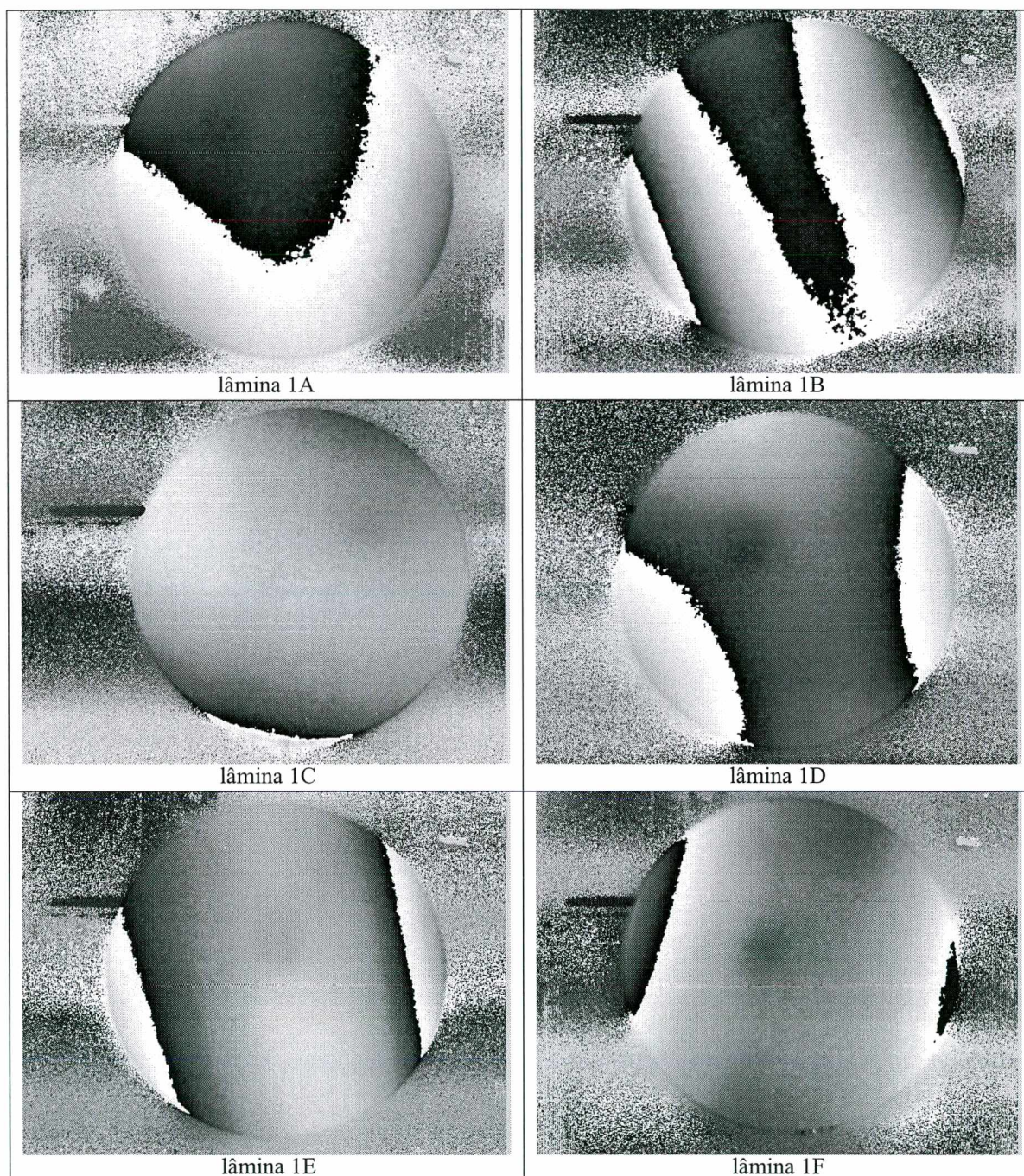
#### **Características principais:**

Lâmpada dicróica Taschibra  
Alimentação: 12V DC @ 4A

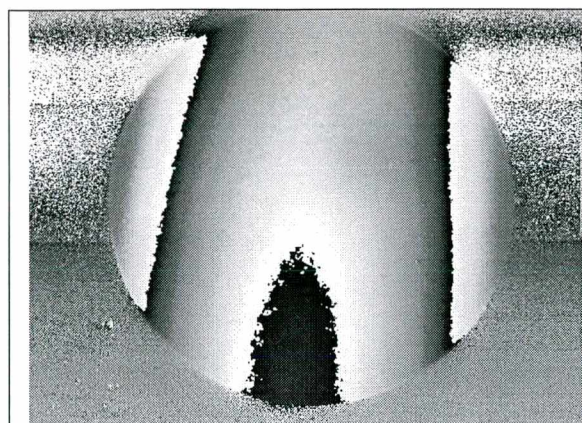


## ANEXO C

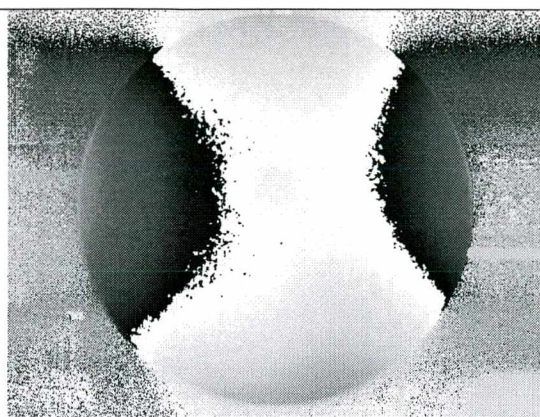
### Mapas de fase obtidos nos ensaios para caracterização de tensões residuais de flexão





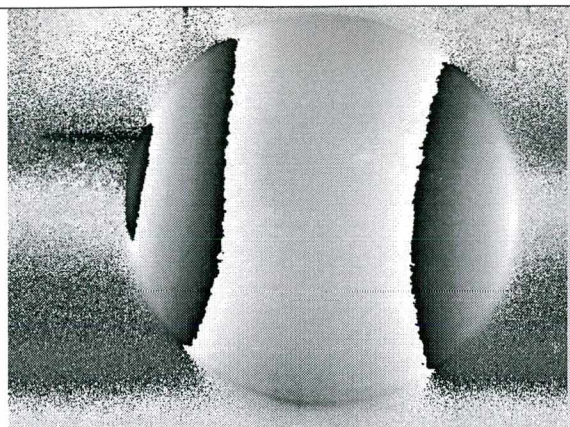


lâmina 1G

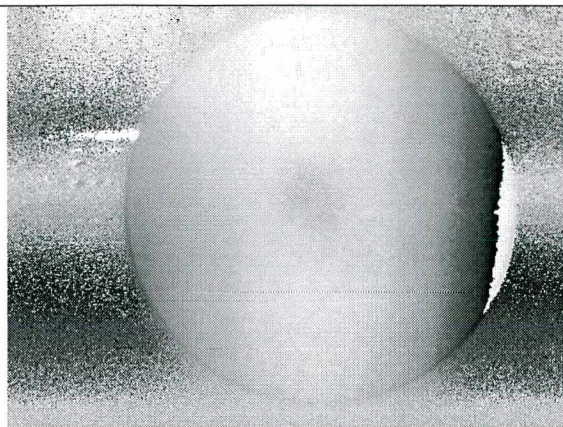


lâmina 1H

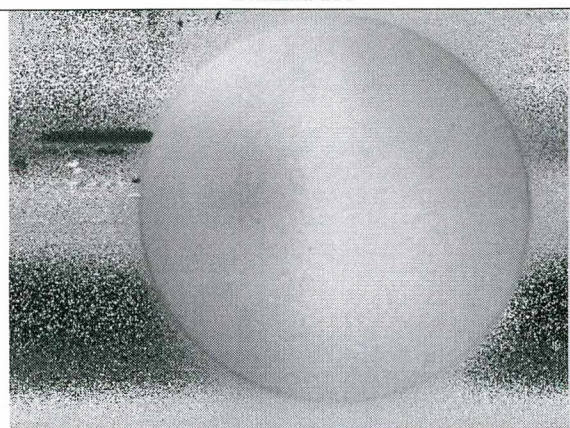




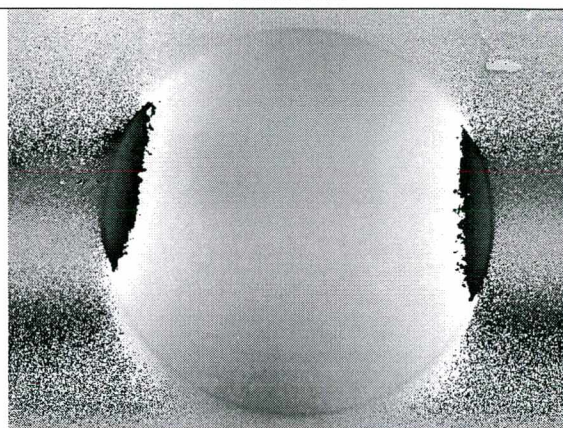
Lâmina 2A



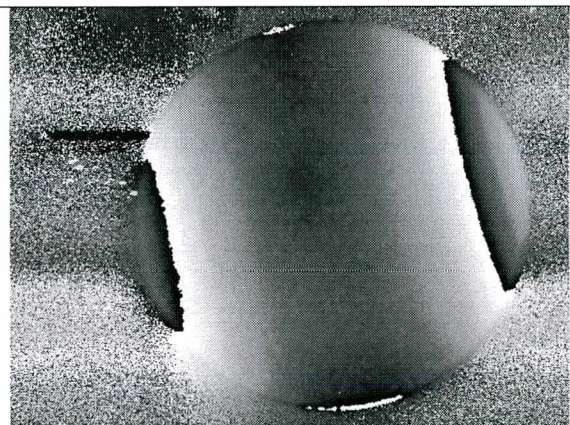
Lâmina 2B



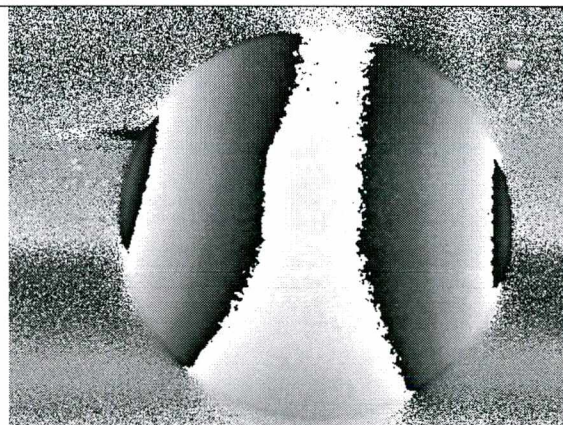
Lâmina 2C



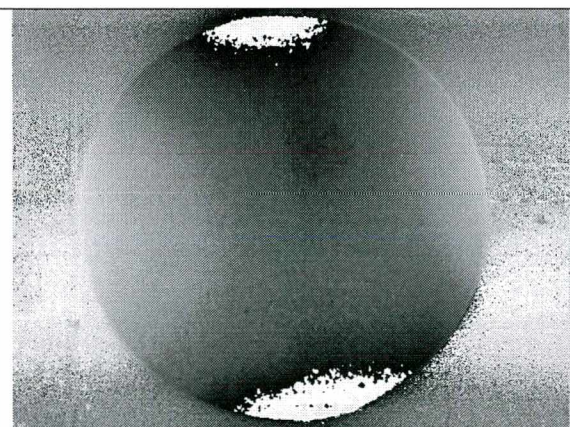
Lâmina 2D



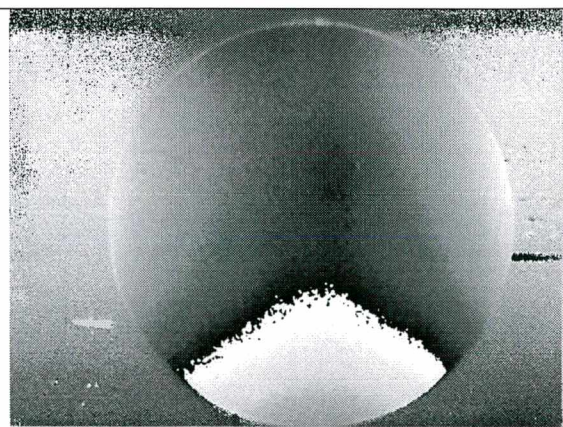
Lâmina 2E



Lâmina 2F

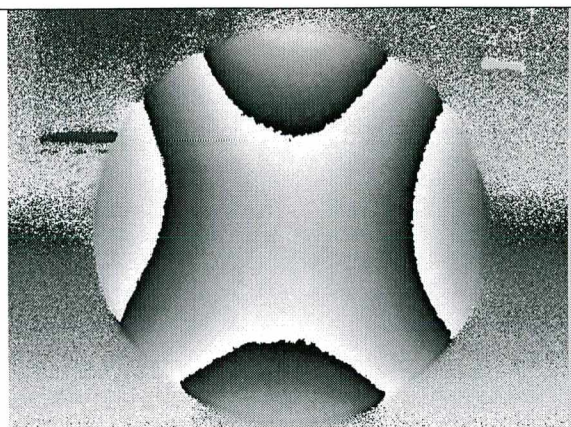


Lâmina 2G

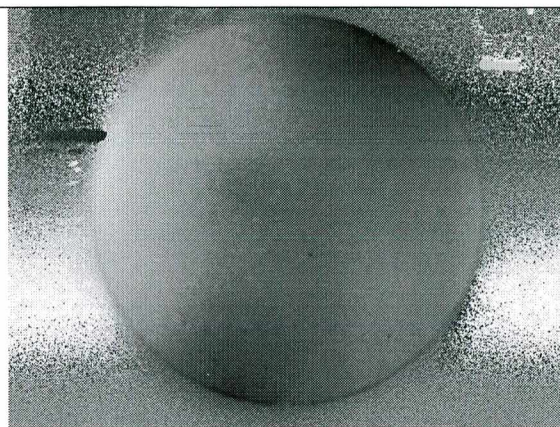


Lâmina 2H

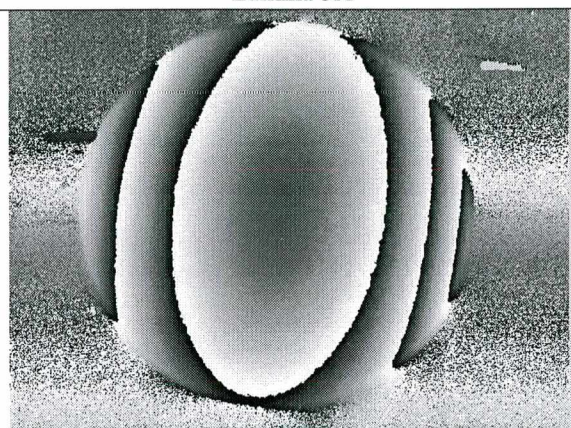




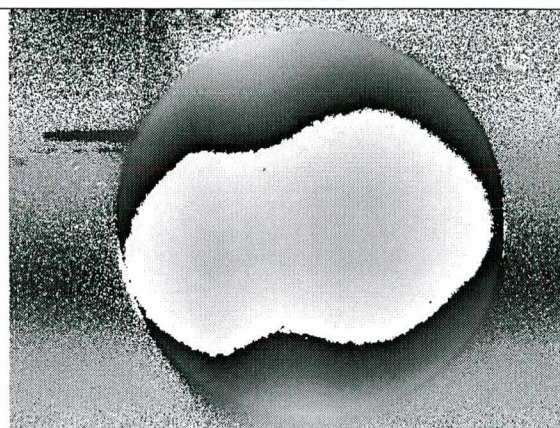
Lâmina 3A



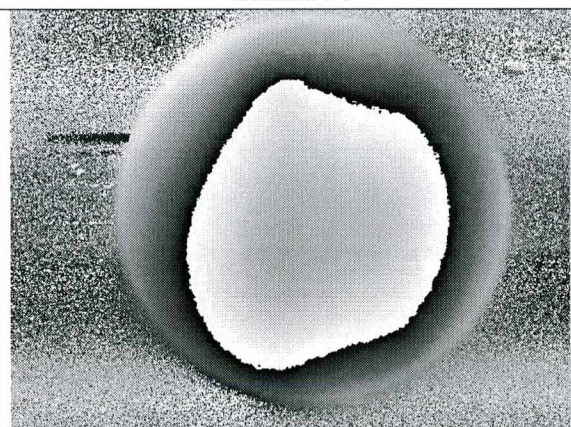
Lâmina 3B



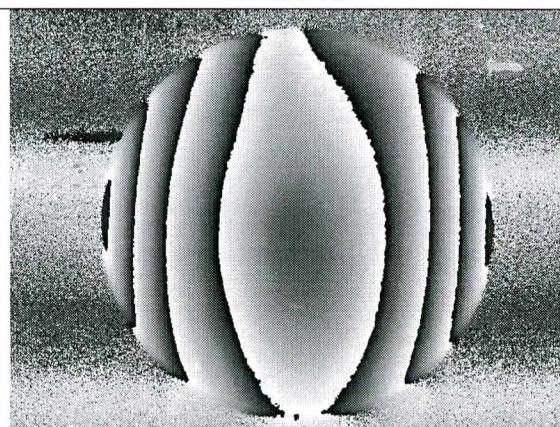
Lâmina 3C



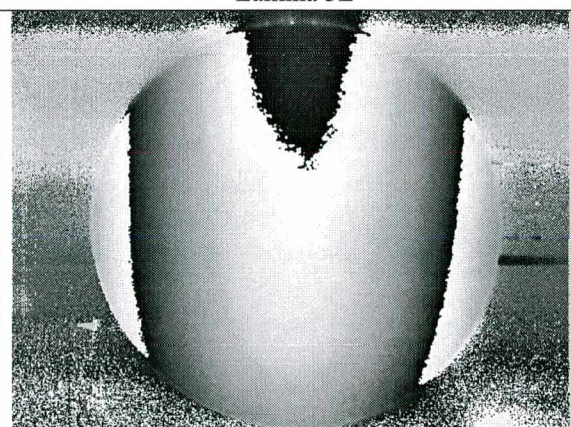
Lâmina 3D



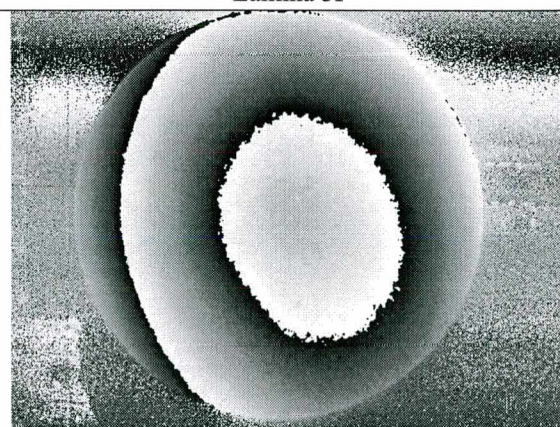
Lâmina 3E



Lâmina 3F

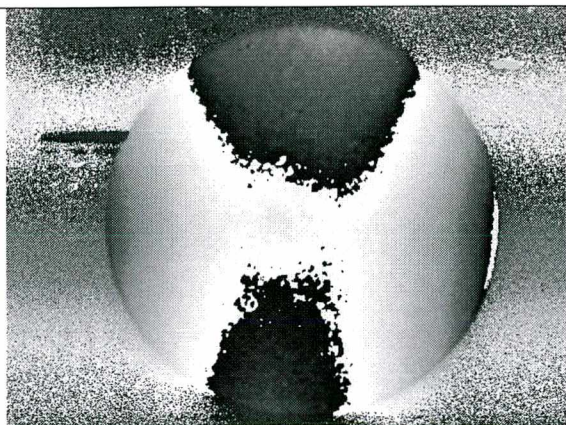


Lâmina 3G

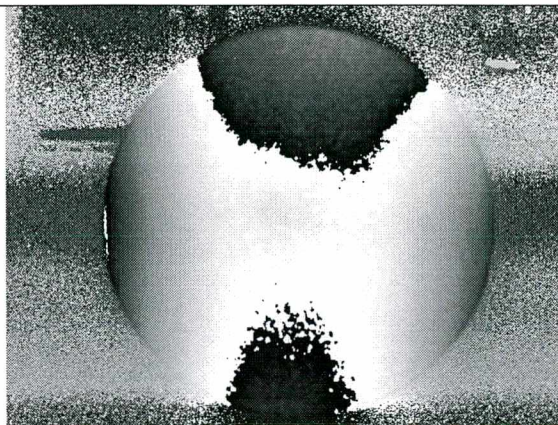


Lâmina 3H

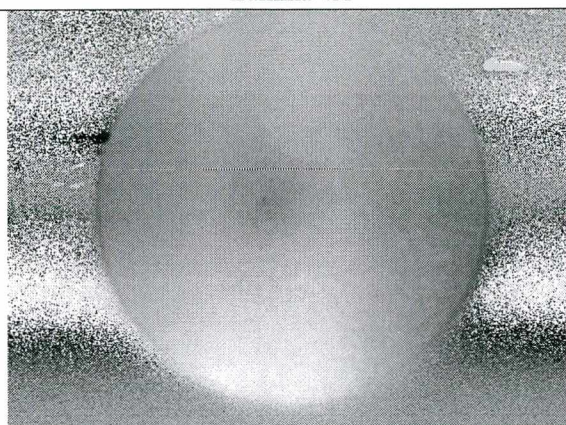




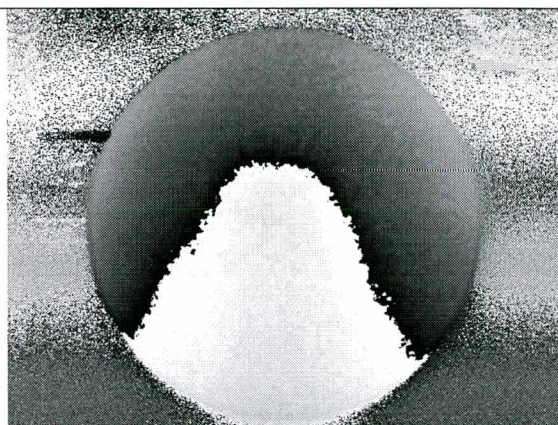
Lâmina 4A



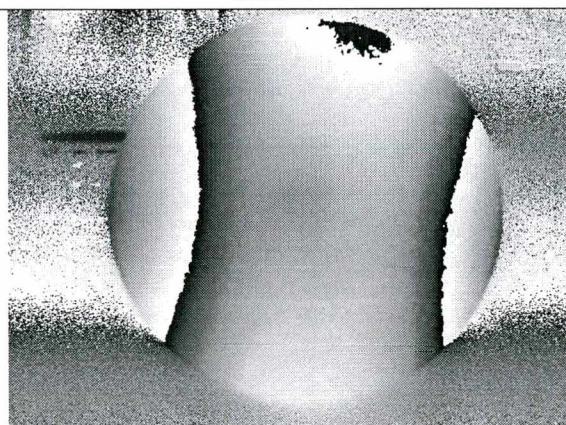
Lâmina 4B



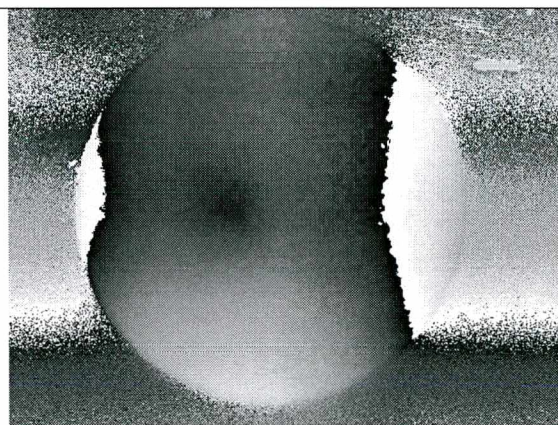
Lâmina 4C



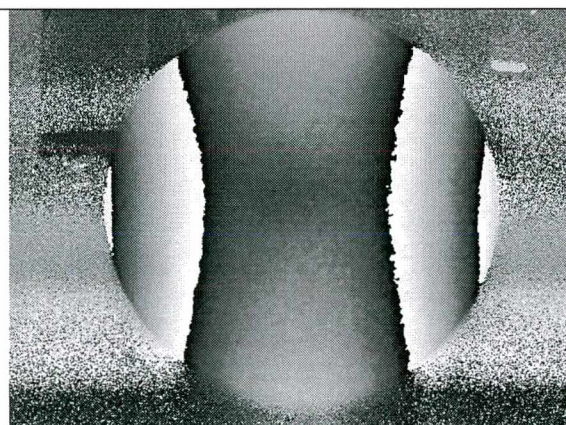
Lâmina 4D



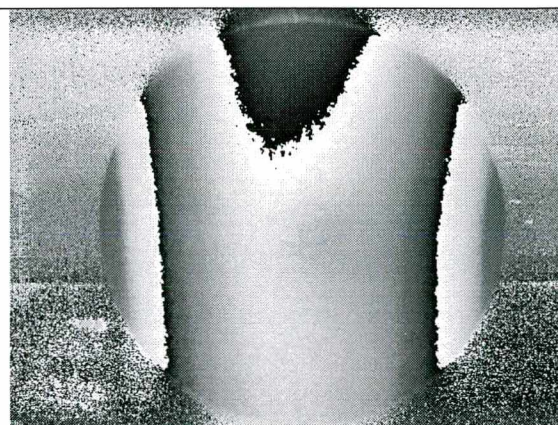
Lâmina 4E



Lâmina 4F

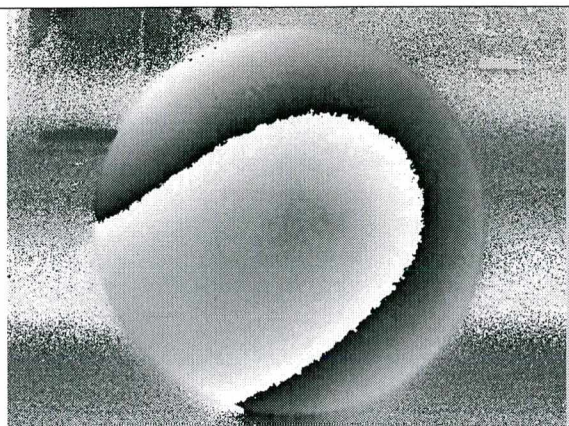


Lâmina 4G

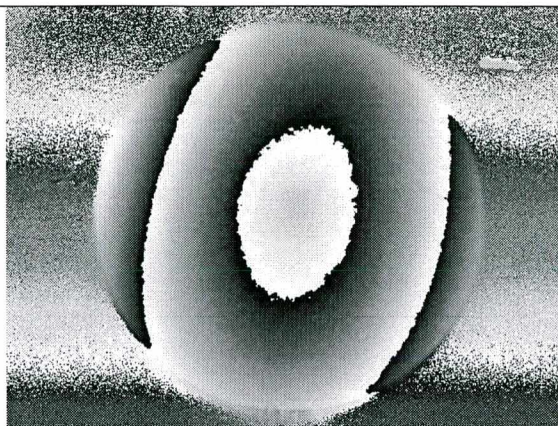


Lâmina 4H

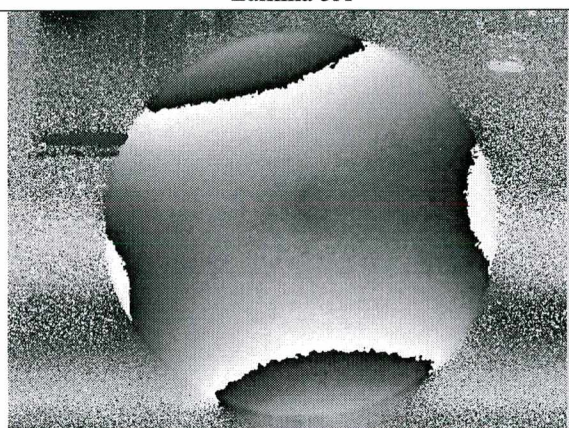




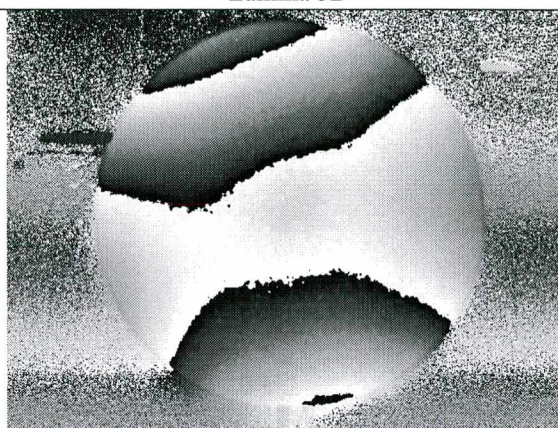
Lâmina 5A



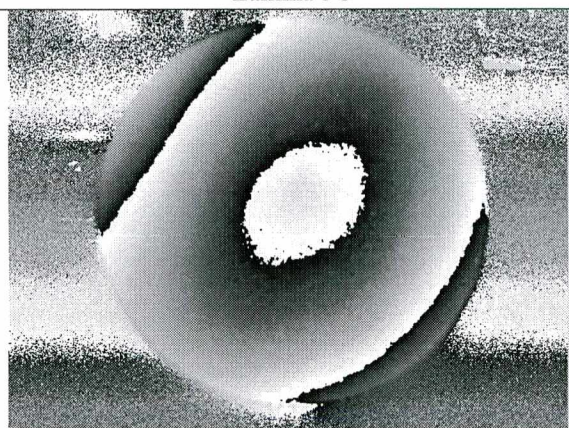
Lâmina 5B



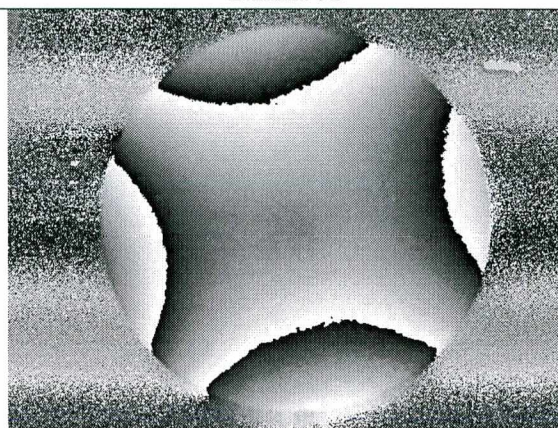
Lâmina 5C



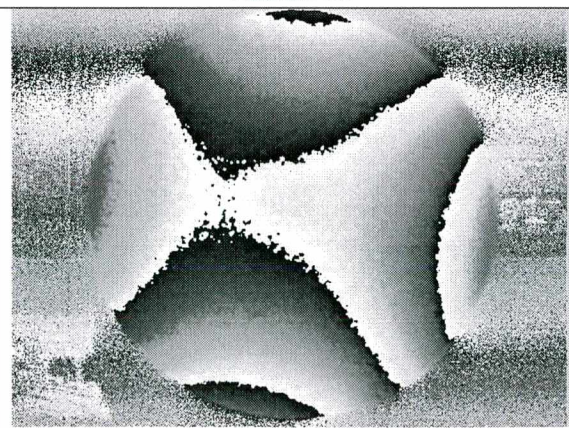
Lâmina 5D



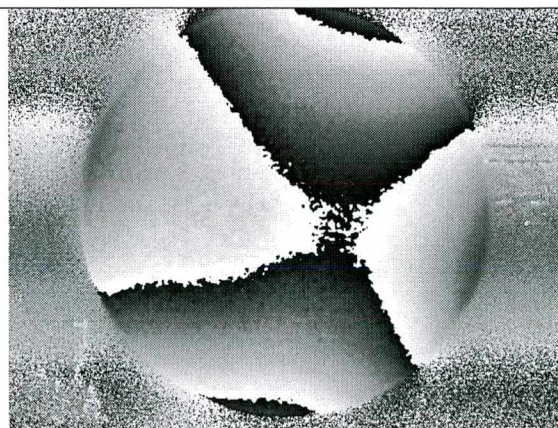
Lâmina 5E



Lâmina 5F

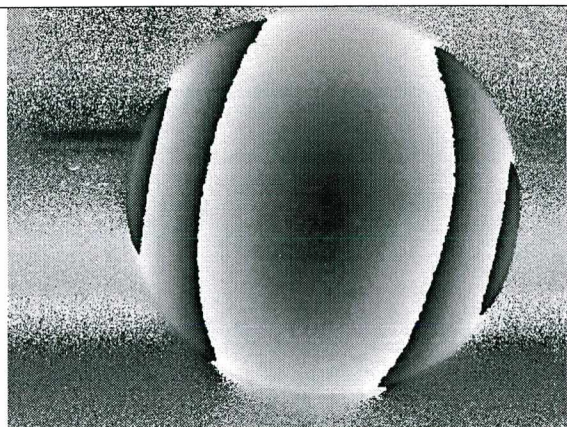


Lâmina 5G

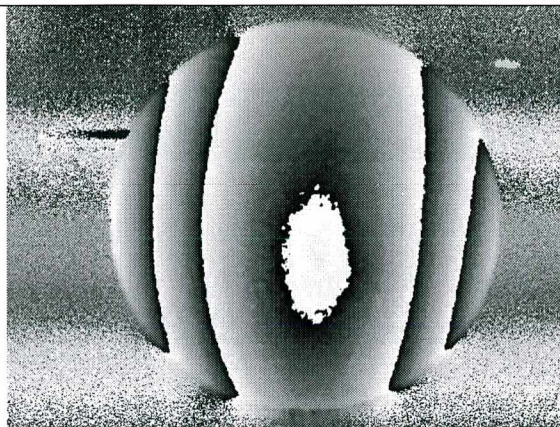


Lâmina 5H

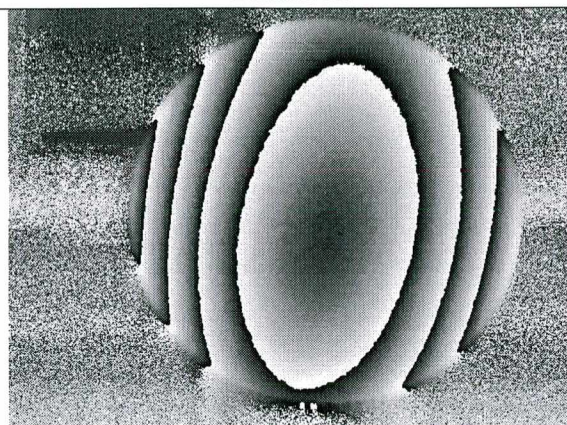




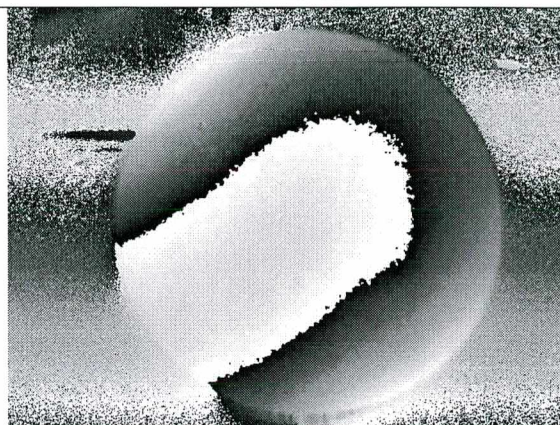
Lâmina 6A



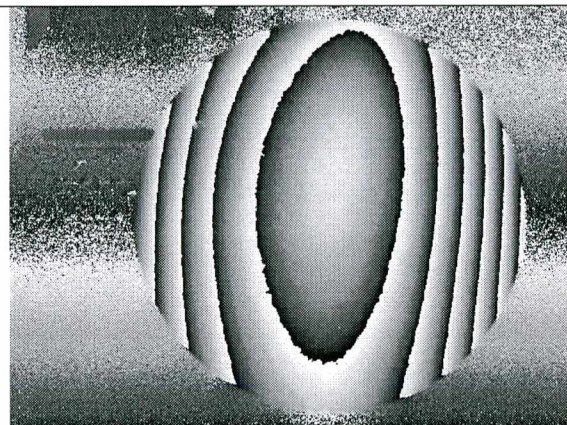
Lâmina 6B



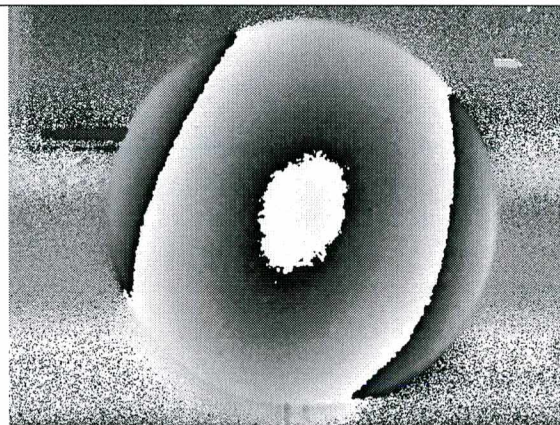
Lâmina 6C



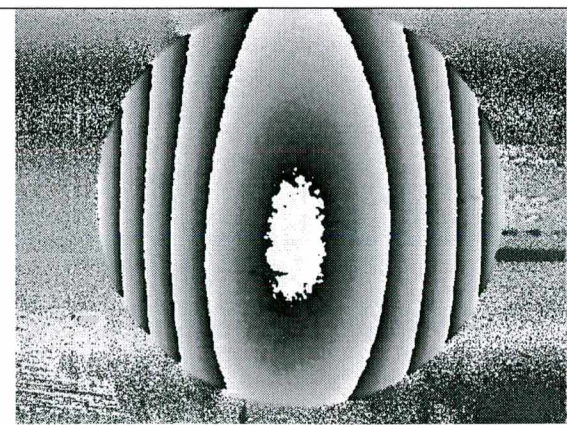
Lâmina 6D



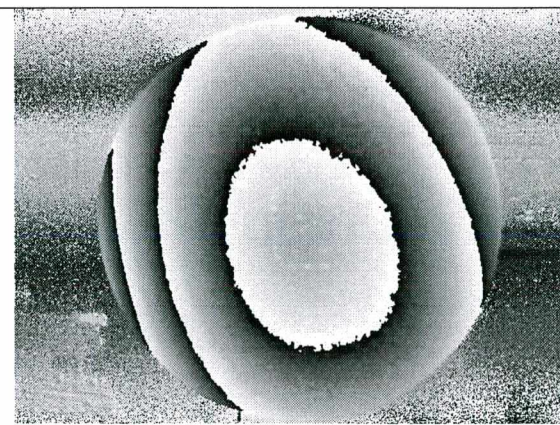
Lâmina 6E



Lâmina 6F

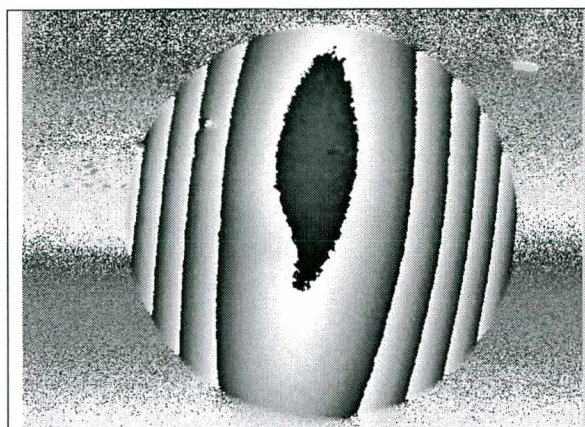


Lâmina 6G

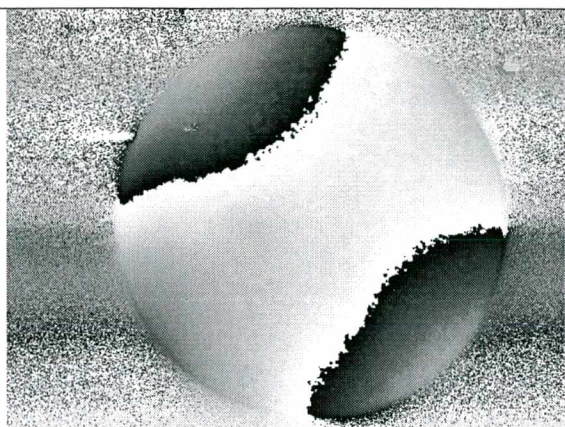


Lâmina 6H

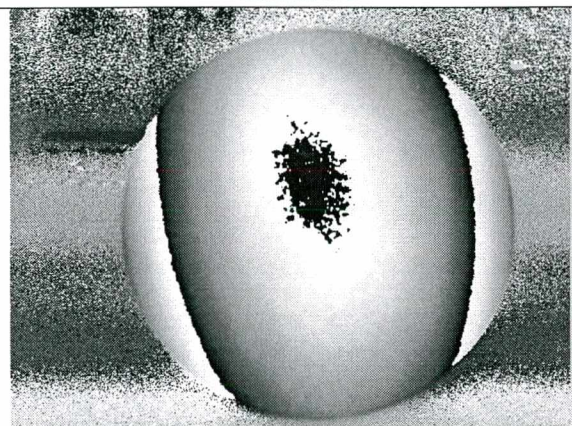




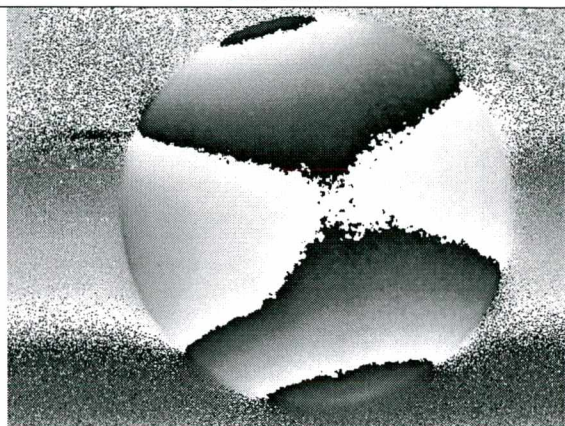
Lâmina 7A



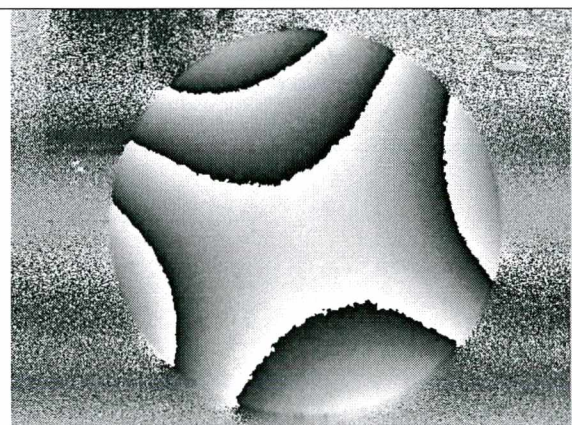
Lâmina 7B



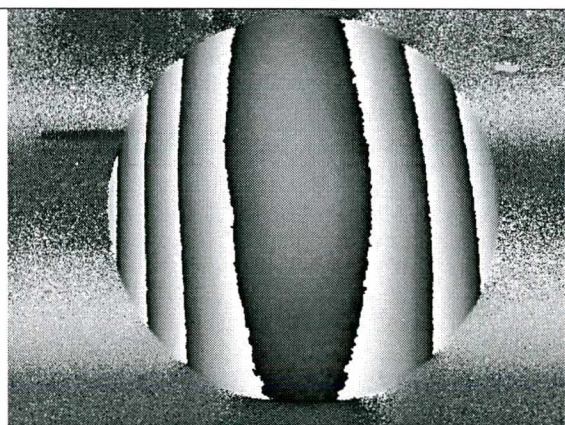
Lâmina 7C



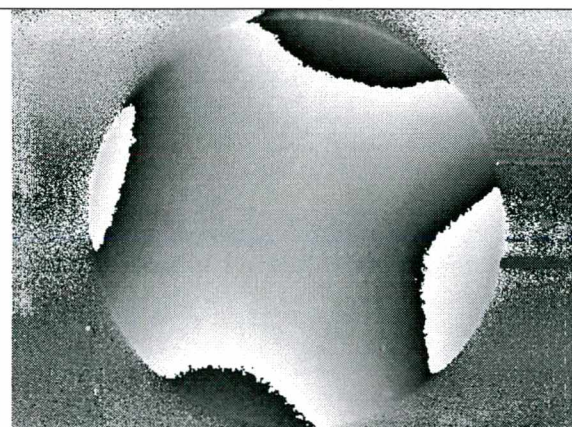
Lâmina 7D



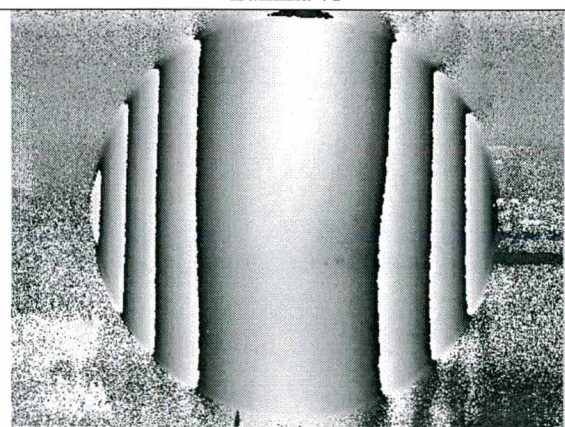
Lâmina 7E



Lâmina 7F

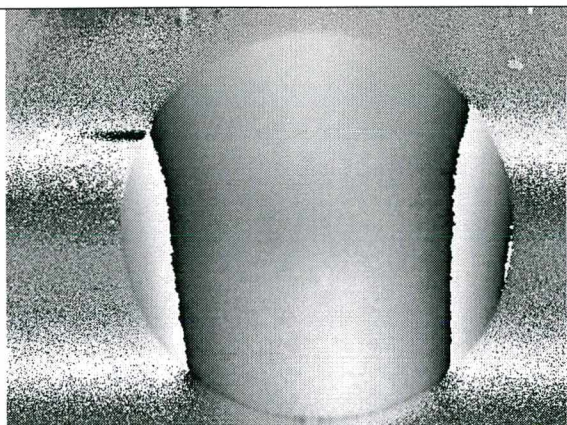


Lâmina 7G

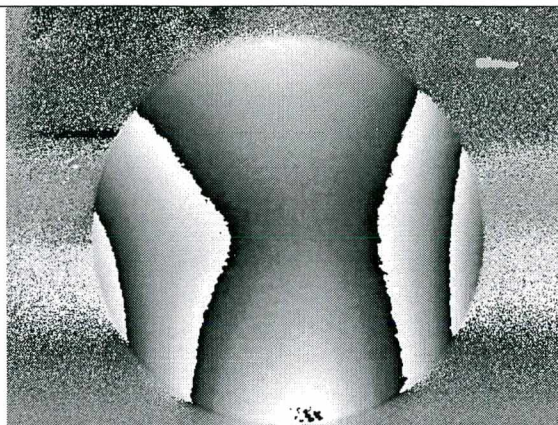


Lâmina 7H

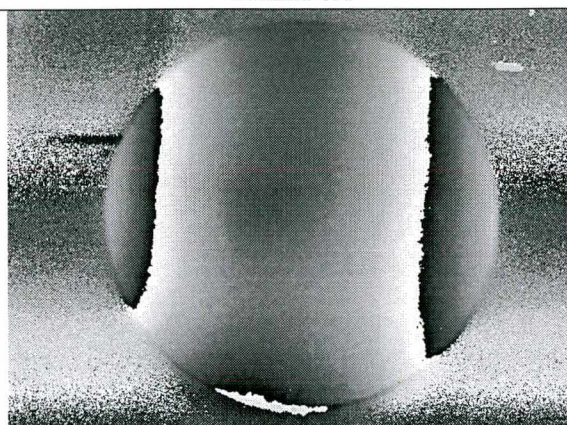




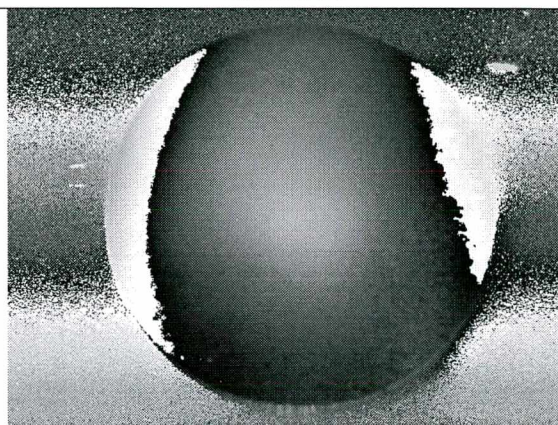
Lâmina 8A



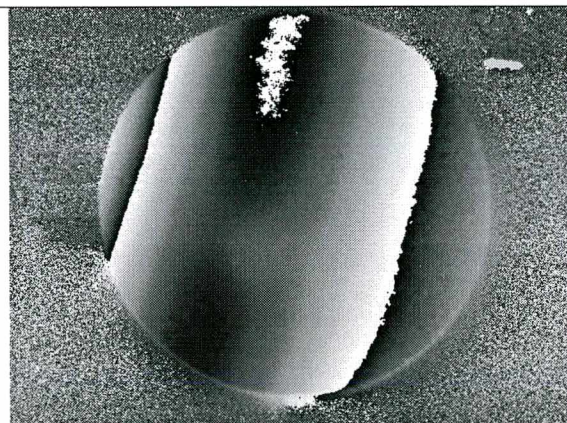
Lâmina 8B



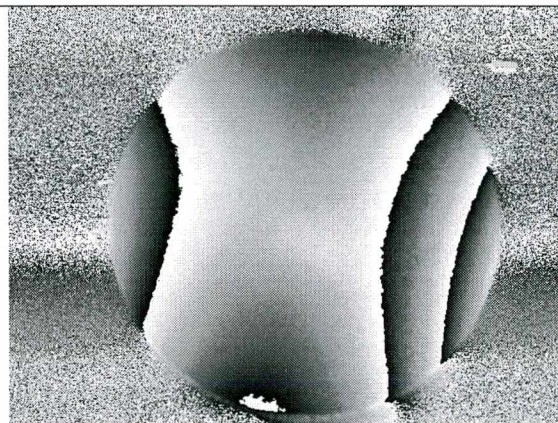
Lâmina 8C



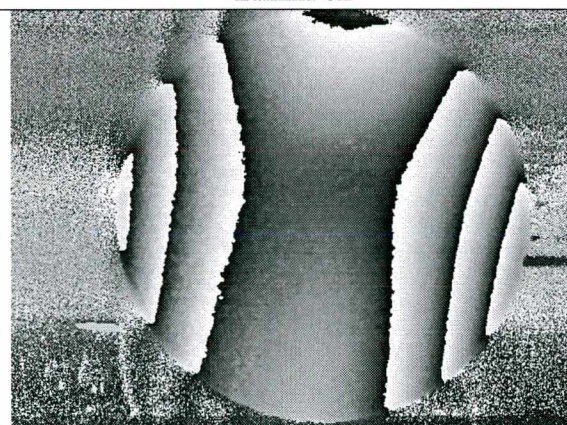
Lâmina 8D



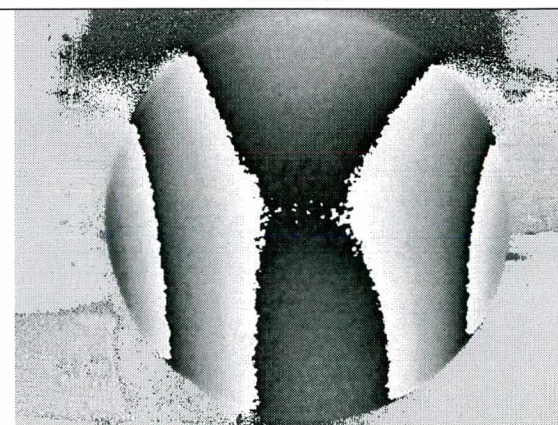
Lâmina 8E



Lâmina 8F

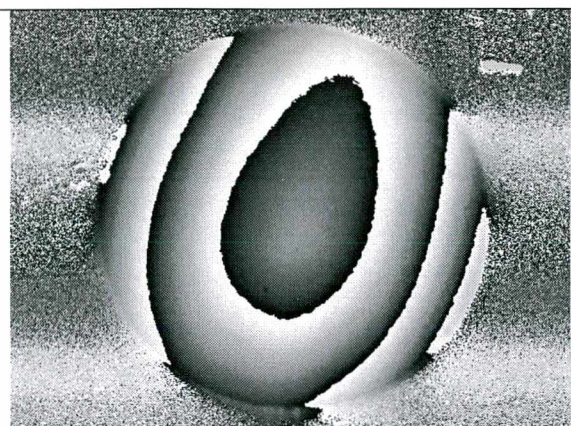


Lâmina 8G

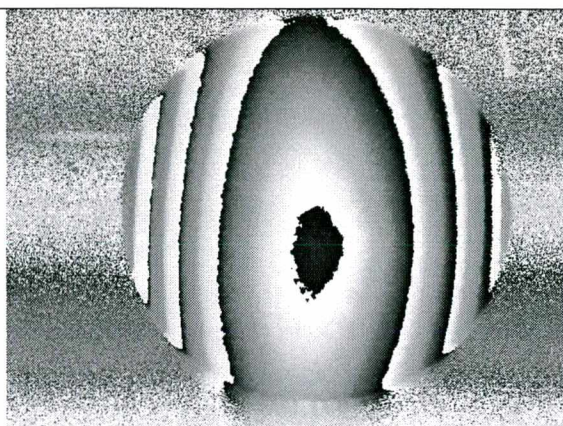


Lâmina 8H

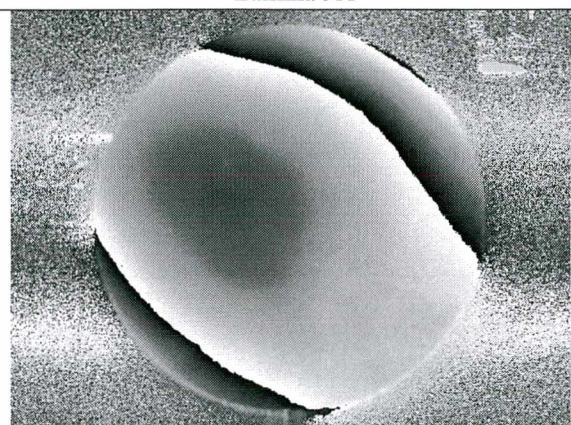




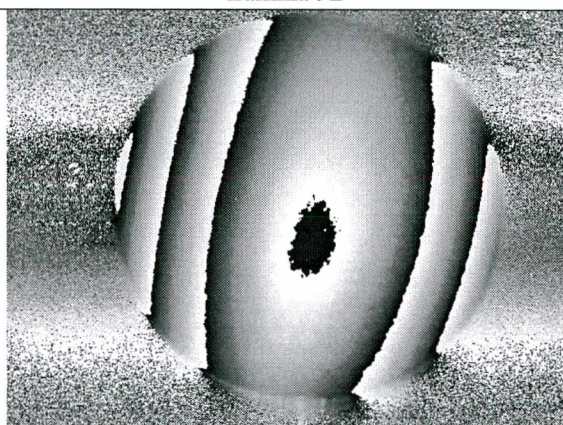
Lâmina 9A



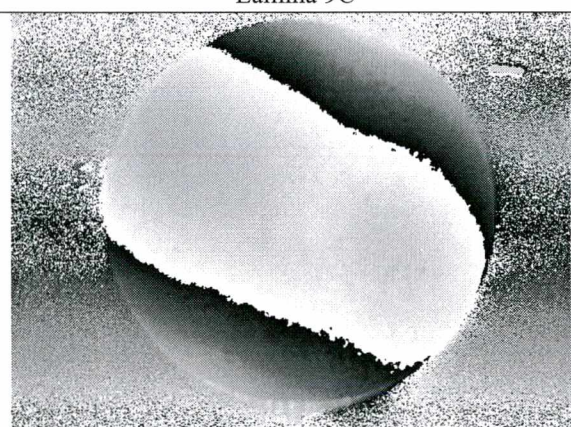
Lâmina 9B



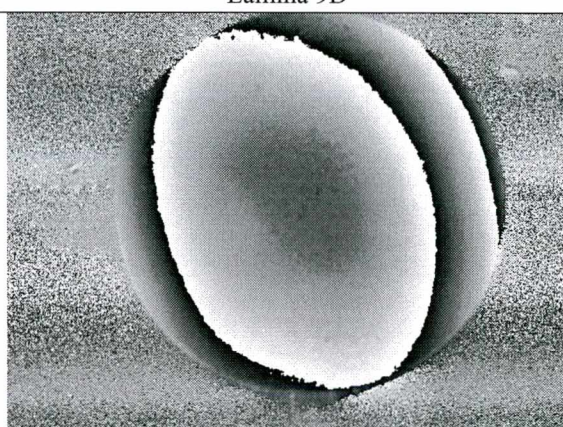
Lâmina 9C



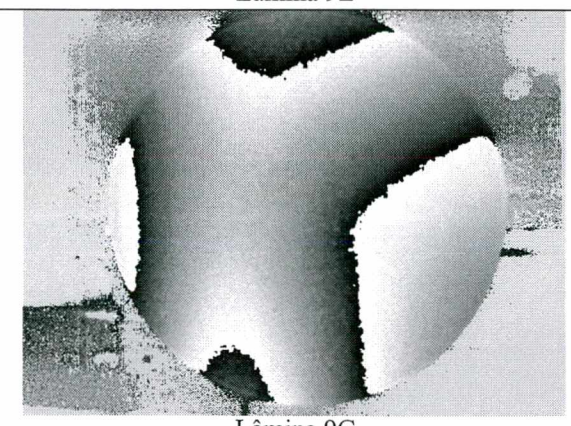
Lâmina 9D



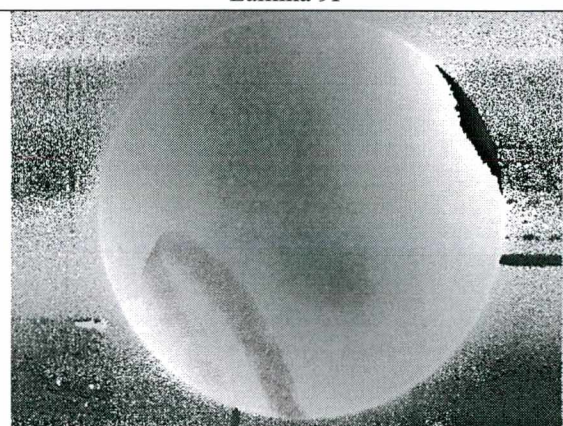
Lâmina 9E



Lâmina 9F



Lâmina 9G



Lâmina 9H